

Candy Crush: la matematica del gioco più famoso del Web

Aprile 2015

€ 4,50

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di **Scientific American**

I paradossi dei buchi neri

Quando il Sole morirà, questi divoratori cosmici di materia potrebbero diventare una fonte di energia. Ma a che prezzo?



Biotecnologie

I divieti in materia di OGM bloccano importanti ricerche sullo sviluppo di farmaci

Evoluzione

Dallo studio dei fossili viventi nuove indicazioni per definire il concetto di specie



**Soldi, salute,
questioni di cuore:
l'educazione al rischio
orienta verso
la scelta migliore.**



**Contro il dogmatismo
dei “nuovi atei”,
un affascinante
percorso attraverso
la storia della scienza.**



Seguiteci su
www.raffaellocortina.it



Raffaello Cortina Editore



Un esperimento mentale suggerisce come estrarre radiazione termica da un buco nero con ascensori spaziali, che però devono resistere alla spaventosa attrazione gravitazionale di questo oggetto celeste. (Illustrazione di Kenn Brown, Mondolithic Studios)

aprile 2015 numero 560

54



ASTROFISICA

28 Energia dai buchi neri?*di Adam Brown*

Una civiltà futura potrà estrarre energia dai buchi neri. Ma per farlo i nostri discendenti dovranno prima costruire un ascensore spaziale che sfiderà le leggi della fisica

EVOLUZIONE UMANA

34 Menti di Neanderthal*di Kate Wong*

Analisi di anatomia, DNA e resti materiali culturali hanno portato novità stimolanti sulla vita interiore dei nostri misteriosi cugini estinti

POLITICHE DELLA RICERCA

42 OGM in medicina: il tesoro sprecato*di Lisa Signorile*

L'ingegneria genetica trasforma microrganismi e piante in reattori per produrre farmaci e vaccini, ma la ricerca italiana in questo campo è frenata da leggi inadeguate, che danneggiano anche l'economia

COMPUTER SCIENCE

48 La complessa matematica di Candy Crush*di Toby Walsh*

I difficili problemi computazionali che si nascondono in questo gioco apparentemente banale potrebbero spiegarne il grande successo

AMBIENTE

54 Alla ricerca della plastica scomparsa*di Alfonso Lucifredi*

Secondo lo studio più completo sull'inquinamento da plastica dei mari mancano all'appello grandi quantità di rifiuti

NEUROSCIENZE

62 Curare la depressione alla radice*di Andres M. Lozano e Helen S. Mayberg*

L'elettrostimolazione cerebrale profonda potrebbe alleviare disturbi dell'umore devastanti

AMBIENTE

68 Un puzzle per il pianeta*di Michael E. Webber*

Il nostro futuro dipende da quanto saremo capaci di integrare energia, acqua e cibo

EVOLUZIONE

74 La verità sui fossili viventi*di Alexander J. Werth e William A. Shear*

Malgrado ogni apparenza contraria, nessuna specie sfugge alla selezione, anche quando è difficile individuarne i passaggi nella documentazione fossile

INFORMATICA

84 Un po' più di memoria*di Massimiliano Di Ventra e Yuriy V. Pershin*

Nuovi componenti elettronici, più simili a neuroni che a transistor, porteranno a un'elaborazione più veloce ed efficiente



12



14



97

Rubriche

7 Editoriale
di Marco Cattaneo

8 Anteprima

10 Intervista
L'evoluzione della frode scientifica *di Alessandro Delfanti*

12 Made in Italy
L'impianto elettrico 2.0 *di Letizia Gabaglio*

14 Scienza e filosofia
La questione del linguaggio *di Telmo Pievani*

15 Appunti di laboratorio
I fringuelli di Darwin *di Edoardo Boncinelli*

16 Il matematico impertinente
Un ricordo di Georg Kreisel *di Piergiorgio Odifreddi*

17 La finestra di Keplero
Buon lavoro, Dawn *di Amedeo Balbi*

18 Homo sapiens
Quel Neanderthal di Altamura *di Giorgio Manzi*

90 Rudi matematici
Ninfe al bivio
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

92 Libri & tempo libero

96 Povera scienza
Cloni umani e scienziati superstar *di Paolo Attivissimo*

97 Pentole & provette
Brodo sotto pressione *di Dario Bressanini*

SCIENZA NEWS		
19 Clima da guerra in Siria	22 Quel collegamento	24 Primi primati: già sugli alberi
20 Un'asimmetria da Higgs	tra Amazzonia e Sahara	25 Verso la decifrazione
20 L'entropia del microcosmo	22 La prima misura diretta dell'impatto	dell'epigenoma umano
21 Come non far rovesciare	della CO ₂ sull'effetto serra	25 I geni che fanno espandere
il caffè	23 Prima ti allevo, poi ti riciclo	il cervello
21 Elettroni al fotofinish	24 Alla ricerca dell'antenato perduto	26 Brevissime

Ogni mese direttamente a casa tua le ultime frontiere della ricerca scientifica e tecnologica.

IN ESCLUSIVA, solo con l'abbonamento, ti assicuri la possibilità di consultare sul **nuovo sito** www.lescienze.it gli oltre **4.200 articoli** pubblicati dal 1968 ad oggi!

E, se vuoi, puoi decidere di **regalare l'abbonamento alle stesse condizioni!**

Fino al
38%
di sconto



SCEGLI LA TUA OFFERTA!

DURATA	PREZZO DI COPERTINA	PREZZO PER TE	RISPARMIO
1 ANNO - 12 NUMERI	€ 54,00	€ 39,00	€ 15,00
2 ANNI - 24 NUMERI	€ 108,00	€ 75,00	€ 33,00
3 ANNI - 36 NUMERI	€ 162,00	€ 99,00	€ 63,00

SCEGLI DI ABBONARTI!

■ È CONVENIENTE

Più aumenta la durata del tuo abbonamento, più aumenta il risparmio!

■ È COMODO

Riceverai Le Scienze ogni mese a casa tua senza alcun costo aggiuntivo e con il prezzo bloccato!

■ È FACILE

✓ Collegati al sito www.ilmioabbonamento.it

✓ Chiama il n. 199.78.72.78* (0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari.)

*Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).

✓ Compila, stacca e spedisci - anche via fax - la cartolina che trovi nella rivista

Oggi puoi leggere
Le Scienze direttamente su iPad.



La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

Le Scienze



di Marco Cattaneo

Editoriale

Il paradosso italiano

Finanziamo studi con OGM che poi fanno ricchi altri

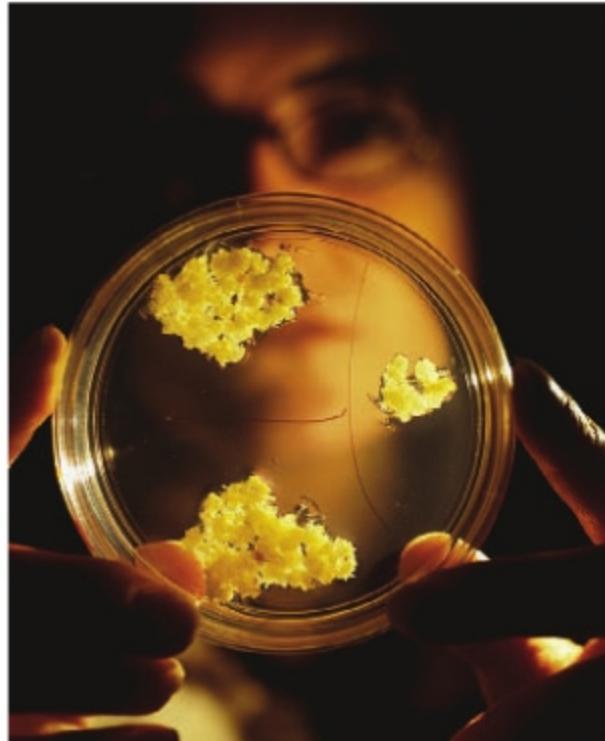
Il 20 febbraio la Commissione Europea ha approvato in via definitiva un trattamento che può restituire la vista a persone che hanno subito gravi lesioni della cornea. Si chiama Holoclar, ed è la prima terapia rigenerativa avanzata a base di cellule staminali registrata al mondo. Viene dal Centro di medicina rigenerativa dell'Università di Modena e Reggio Emilia, è stata messa a punto da Michele De Luca e Graziella Pellegrini ed è stata sviluppata da Holostem, spin-off dell'ateneo emiliano in partnership con Chiesi Farmaceutici.

Nemmeno due anni fa, il gruppo di Luigi Naldini all'Istituto San Raffaele Telethon per la terapia genica di Milano ha pubblicato i rivoluzionari risultati della sperimentazione di un'innovativa terapia genica da cellule staminali ematopoietiche su due malattie genetiche, la leucodistrofia metacromatica e la sindrome di Wiskott-Aldrich: finora, il più clamoroso successo della terapia genica nel mondo. E se a questo si aggiungono, per esempio, i risultati conseguiti negli anni dal gruppo di Andrea Ballabio a Napoli sulle malattie genetiche e le recentissime scoperte di Alberto Mantovani alla Humanitas di Milano sull'immunoterapia del cancro, ce n'è abbastanza per dire che in questi anni di vacche smunte l'Italia riesce comunque ad avere un ruolo di primo piano a livello mondiale nella ricerca medica. Molto più di quanto sarebbe lecito aspettarsi da un paese che finanzia la ricerca a livelli che sfiorano il ridicolo.

E a voler cercare ci sono altri esempi di ricerca d'eccellenza nel campo delle scienze mediche. Anche poco noti. Tra questi, gli studi condotti dai nostri enti pubblici di ricerca nell'ambito del progetto Pharma-Planta, una collaborazione internazionale realizzata tra il 2004 e il 2011 che puntava all'uso di piante come bioreattori per la produzione di molecole di interesse farmacologico. Perché le piante, spiega Lisa Signorile a p. 42, «sono spesso in grado di produrre proteine farmacologicamente

o immunologicamente attive in forma più fedele all'originale e a costi meno elevati rispetto ai sistemi classici che coinvolgono i microrganismi».

Il problema è che queste piante sono OGM. E come tali sono soggette alle stesse regole che disciplinano gli OGM in campi agroalimentare. Regole che in Europa, e ancor più in Italia, sono particolarmente



restrittive. Così accade che un patrimonio di conoscenze acquisite nei nostri laboratori si ferma lì, prima della sperimentazione clinica. Lo Stato, dunque, «finanzia progetti per migliorare le conoscenze mediche e produrre applicazioni che portano a farmaci o vaccini [...] però blocca in embrione la ricerca che ha sovvenzionato, costringendo ricercatori ed enti di ricerca a brevettare le loro ricerche e vendere i brevetti all'estero, dove le scoperte fatte in Italia verranno poi trasformate in farmaci o vaccini, che saranno infine acquistati in Italia».

Di tanto in tanto, quando penso alla capacità di questo paese di produrre conoscenza potenzialmente utile allo sviluppo economico, mi lascio trasportare da momenti di sfrenato ottimismo per il futuro. Poi mi sveglio d'improvviso, tutto sudato, e ritorno all'amara realtà.

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Ernest J. Moniz
docente, Massachusetts Institute of Technology

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak

direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore associato filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Ai confini della scienza

Oltre il limite, di Michael Brooks, è il libro allegato con il numero di maggio

Gli scienziati non amano le certezze. Ovviamente la riuscita di un esperimento o l'elaborazione di una teoria coerente sono sempre salutate con soddisfazione dagli addetti ai lavori. Ma se parlate con un ricercatore, quasi sicuramente salterà fuori un suo fascino perverso per l'ignoto, per quello che ancora non sa. Del resto, se c'è una cosa che la storia della scienza insegna è che le grandi scoperte spesso sono figlie di avventure in territori sconosciuti al sapere. E anche oggi, in un'epoca in cui la ricerca non sembra possa regalare novità stravolgenti, in realtà il mondo è pieno di scienziati che lavorano ai confini della conoscenza, di tanto in tanto ritrovandosi dall'altra parte, con risultati che indicano nuovi mondi da perlustrare.

Non c'è ambito della scienza che sia escluso da questa irresistibile attrazione per l'ignoto, come racconta Michael Brooks in *Oltre il limite, 11 scoperte che hanno rivoluzionato la scienza*, il libro in edicola con «Le Scienze» di maggio e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni. Il prologo di questo viaggio è la coscienza, e non poteva essere altrimenti. Per lungo tempo ambito riservato ai filosofi, grazie ai progressi delle neuroscienze lo studio della coscienza è ora territorio di conquista per la comunità scientifica. Sebbene ancora non si sia giunti a una conclusione, spiega Brooks, un paio di teorie molto promettenti lasciano ben sperare, per esempio quella sviluppata dall'italiano Giulio Tononi, neuroscienziato e psichiatra dell'Università del Wisconsin.

L'epilogo del viaggio di Brooks è il tempo. Quello che per noi è un fluire degli eventi scontato sembra invece uscire malconcio da tutto ciò che abbiamo imparato negli ultimi 100 anni grazie alla meccanica quantistica. Scordiamoci il tempo assoluto definito da Isaac Newton sul finire del XVII secolo; oggi la fisica ci dice che quello che chiamiamo tempo è quasi certamente un'illusione. E lo suggeriscono anche gli esiti di alcuni studi neuroscienti-

fici su soggetti con lesioni in particolari aree cerebrali oppure con un'attività del cervello alterata rispetto a quella normale in seguito all'assunzione di sostanze.

Tra l'inizio e la fine del viaggio, in compagnia di Brooks attraversiamo altri ambiti in cui sono stati superati confini che sembravano invalicabili. Uno, clamoroso, riguarda il ruolo delle fisica dei quanti in biologia, un connubio per lungo tempo ritenuto impossibile. Ben oltre la fotosintesi, il processo grazie a cui le piante sfruttano i fotoni del Sole per produrre composti organici e ossigeno cruciale per la vita come la conosciamo, la meccanica quantistica sembra avere un ruolo importante anche nella capacità di diverse specie di orientarsi nell'ambiente e di percepire gli odori. Un altro esempio clamoroso di confini ritenuti invalicabili e invece valicati riguarda gli esseri viventi. La genesi di organismi chimera, cioè ibridi tra specie diverse, delle quali una potrebbe essere la nostra, è sempre meno fantascientifica. Del resto, spiega Brooks, già Charles Darwin ci aveva tolto lo scettro del regno animale nella metà del XIX secolo, inoltre studi recenti hanno suggerito che alcune specie animali mostrano quello che noi chiamiamo personalità, cultura e trasmissione culturale quando ci riferiamo a nostri simili.

Nel viaggio c'è anche spazio per l'epigenetica, quell'ambito della genetica che fa luce sulla capacità dell'ambiente di influire in modo dinamico sull'espressione dei geni. E c'è spazio per alcuni misteri che riguardano il cosmo. Gli ultimi risultati del satellite Planck, che ha mappato la radiazione fossile del big bang, e di LHC, il collisore del CERN di Ginevra che ha misurato la massa del bosone di Higgs, non andrebbero d'accordo con lo scenario dell'inflazione, la rapida espansione ipotizzata dai cosmologi per l'universo dei primordi che spiegherebbe alcuni parametri dell'universo attuale. Il condizionale è d'obbligo nei territori di frontiera, perché come disse il fisico Richard Feynman: «Tutto ciò che sappiamo è una sorta di approssimazione».



RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 7,90 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 chi chiama da telefoni non abilitati). Possono anche

acquistare il volume **Esperimenti scientifici** al prezzo di € 9,90 incluso il prezzo di spedizione e il DVD **Odifreddi racconta Gödel e Turing** al prezzo di € 8,90 incluso il prezzo di spedizione. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di

14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

Il cosmo secondo Morgan Freeman

A richiesta ad aprile il primo DVD della collana *Morgan Freeman Science Show*

Negli ultimi tempi cosmologia e astrofisica hanno vissuto momenti entusiasmanti grazie a risultati ottenuti da strumenti di nuova generazione e a proposte teoriche innovative. Per dare un quadro della situazione nei molteplici ambiti dello studio del cosmo, «Le Scienze» pubblica una collana di sei DVD con uscita mensile dal titolo *Morgan Freeman Science Show. Alla scoperta dell'universo*. Come indica il titolo, è l'attore Morgan Freeman il narratore che accompagna gli spettatori nelle varie puntate insieme a scienziati di fama mondiale. Nella prima uscita, DVD (94 minuti) a richiesta ad aprile a 8,90 in più rispetto al prezzo della rivista, iniziamo dal big bang e dalla ricerca di vita extraterrestre.

Proprio cinquant'anni fa gli statunitensi Arno Penzias e Robert Wilson dei Bell Laboratories pubblicarono su «Astrophysical Journal» la scoperta del segnale della radiazione cosmica di fondo nelle microonde, l'eco fossile del big bang, che avevano rilevato per caso l'anno precedente mentre lavoravano alla costruzione di un'antenna per telecomunicazioni via satellite. L'involontario risultato dei due era un punto cruciale a favore di previsioni teoriche elaborate tra gli anni venti e gli anni quaranta, secondo cui l'universo era nato da qualcosa di simile a un'immane esplosione, chiamata appunto big bang, e da quel momento in poi era in espansione. Penzias e Wilson furono premiati nel 1978 con il Nobel per la fisica, i cosmologi con una teoria dell'evoluzione dell'universo che finalmente poggiava su solide basi sperimentali, almeno così sembrava.

In effetti, soprattutto di recente ha preso vigore una nuova corrente cosmologica che mette in dubbio la cosiddetta singolarità, il punto infinitamente piccolo, denso e caldo da cui, nella teoria del big bang, tutto avrebbe avuto inizio e in cui le leggi della fisica non hanno più valore. Nuove proposte suggeriscono per esempio

un modello ciclico nel quale si susseguono infinite esplosioni generatrici di universi, di cui l'attuale non sarebbe che uno dei tanti. In un'altra ipotesi il nostro universo, che oggi ha 13,8 miliardi di anni, collide ogni 1000 miliardi di anni con un altro universo parallelo, e quella collisione, o meglio quelle collisioni cicliche, sarebbero tanti big bang, di cui uno ha lasciato traccia nella radiazione rilevata da Penzias e Wilson. In questa nuova corrente di proposte quindi c'è anche la risposta alla domanda: che cosa c'era prima del big bang? Insieme alla singolarità, questo interrogativo fa parte dei punti deboli della teoria del grande botto iniziale

dal nulla, criticata anche da Albert Einstein, il quale la derideva con sarcismo definendola troppo simile alla Genesi descritta nella Bibbia. Ora spetterà a osservazioni ed esperimenti validare o confutare le alternative al big bang, sebbene alcune nuove proposte siano incomplete.

L'altro argomento illustrato da Morgan Freeman nel DVD non è meno affascinante. La vita extraterrestre è stata per lungo tempo appannaggio della fantascienza, e solo negli ultimi decenni è passata con merito nell'ambito scientifico. Forse l'impresa più conosciuta è il progetto SETI, che ascolta i segnali provenienti dal cielo in attesa di una trasmissione riconducibile a un'intelligenza aliena. Tuttavia, agli inizi degli anni novanta, dopo la scoperta dei primi pianeti di altri sistemi stellari, la caccia a ET ha allargato orizzonti e tipo di preda. Ormai numerosi telescopi da terra e nello spazio osservano l'universo in cerca di mondi alieni con grande successo, considerati gli oltre 1800 pianeti extrasolari identificati fino a oggi.

E gli scienziati ipotizzano che le eventuali forme di vita extraterrestre che scopriranno non avranno nulla in comune con noi esseri umani, probabilmente saranno microrganismi o magari qualcosa di simile alle piante terrestri. Gli strumenti quindi sono pronti per rilevare eventuali firme di attività biologica su altri pianeti. Non resta che aspettare e migliorare quando possibile le nostre capacità di ascolto.



PIANO DELL'OPERA

1 Cosa è successo prima del Big Bang?
Siamo soli nell'Universo?

2 Si può viaggiare nel tempo?
Come siamo arrivati fin qui?

3 Di cosa siamo fatti?
L'enigma dei Buchi Neri

4 Oltre la materia oscura
Esiste un Creatore?

5 La particella di Dio
Cos'è il nulla?

6 Tempo e spazio infiniti?
Sopravviveremo alla fine del sole?

di Alessandro Delfanti

L'evoluzione della frode scientifica

Le pubblicazioni digitali e l'enfasi sulle valutazioni numeriche della ricerca stanno cambiando anche la cattiva condotta tra gli scienziati, spiega Mario Biagioli

Da sempre anche gli scienziati, non tutti ovviamente, commettono scorrettezze o frodi: per esempio falsando i dati o plagiando ricerche effettuate da colleghi. Internet però ha cambiato le forme di comunicazione della ricerca, e con esse le forme di frode o di condotta eticamente scorretta. Inoltre le nuove forme di valutazione, per esempio le metriche che calcolano le pubblicazioni o le citazioni, hanno alimentato comportamenti il cui obiettivo è soddisfare le metriche stesse, e non produrre ricerca di qualità. Mario Biagioli, professore di storia, legge e studi sociali sulla scienza all'Università della California a Davis, riflette su che cosa significhi oggi pubblicare e valutare la ricerca scientifica e quali siano i confini legali ed etici dei comportamenti assunti dai ricercatori o dalle università.

Lei ritiene che le modalità della frode scientifica stiano cambiando, perché?

Il mio interesse nasce dall'osservazione che la cattiva condotta nella ricerca scientifica e più in generale nell'università si sta modificando con lo sviluppo delle pubblicazioni digitali. La rete rende più facile il plagio, ma anche il controllo, e ha moltiplicato il numero delle pubblicazioni. Tuttavia a questo va aggiunta l'enfasi su forme di valutazione strettamente numeriche, per esempio metriche basate su numero di citazioni e *impact factor* della rivista, oppure la centralità crescente del *curriculum vitae* come «passaporto accademico».

Da una fase in cui si descriveva il lavoro del ricercatore con la formula «pubblica o muori» siamo passati a un sistema in cui l'imperativo è «fatti contare o muori». Al di là della questione della violazione evidente delle norme professionali, mi sto chiedendo come sia possibile giocare con le regole stesse del gioco, sfruttandone i punti deboli, nel momento in cui le metriche diventano la madre di tutte le valutazioni.

Le regole del gioco però non sono decise dai singoli scienziati.

Infatti in passato la frode era legata al comportamento di singoli ricercatori, ed era grezza e ambiziosa allo stesso tempo, ed esponeva l'autore al pericolo di essere scoperto. Nel caso dell'uomo di Piltdown, tanto per fare un esempio, nel 1912 venne assemblato uno scheletro usando ossa umane e di primati per simulare lo spettacolare ritrovamento di un anello mancante nell'evoluzione di *Homo sapiens*.

Oggi questi fenomeni esistono ancora: si pensi al caso del sudcoreano Hwang Woo-suk e alla fabbricazione di dati falsi sulla ricerca sulla clonazione umana. Oggi però la frode è anche attuata da ricercatori che non cercano la fama ma vogliono solo costruirsi un curriculum gonfiato che rispetti le aspettative delle valutazioni numeriche. Se una commissione di valutazione si limita ad



CHI È



Mario Biagioli insegna legge, storia e studi sociali sulla scienza e tecnologia all'Università della California a Davis, dove dirige il Center for Science and Innovation Studies. In passato ha lavorato all'Università della California a Los Angeles e alla Harvard University.

Come storico della scienza è autore, tra gli altri, di libri e articoli su Galileo Galilei, sul ruolo della proprietà intellettuale nella scienza moderna e sull'evoluzione del concetto di autore nella ricerca scientifica.

Al momento sta lavorando a *L'autore come vegetale*, un libro sul ruolo delle metafore ecologiche nelle discussioni contemporanee sui beni comuni della conoscenza. A Davis sta organizzando la conferenza internazionale: *Giocare con le regole del gioco: la cattiva condotta nell'era delle metriche*.

analizzare il curriculum, può essere favorevolmente impressionata dalla sua lunghezza senza sapere che le pubblicazioni sono in realtà frodi o plagi.

Quali sono gli esempi più comuni?

Ce ne sono molti. Penso al mercato crescente delle conferenze false, che hanno titoli vaghi in modo da permettere alle persone di presentare uno studio su un tema qualsiasi e pubblicarlo negli «atti». Si tratta di conferenze di cui nessuno sa nulla – siamo sicuri che avvengano davvero? – e atti che nessuno leggerà, ma verran-

no inseriti nel curriculum. Lo stesso vale per case editrici o riviste oscure: un mercato creato dall'uso della valutazione quantitativa, che produce molte pubblicazioni legittime, alcune dubbie e alcune fraudolente. Inoltre abbiamo a che fare con false lettere di raccomandazione, false *peer review* o premi a pagamento.

Proliferano anche le riviste digitali, in alcuni casi senza un'attenzione alla qualità

Anche questo permette la crescita del fenomeno dei ricercatori che pubblicano per nascondere il proprio lavoro invece che per farlo conoscere. Nelle università in cui il controllo di qualità è meno stretto ma il numero di pubblicazioni resta la forma principale di valutazione proliferano articoli pubblicati su riviste o case editrici poco visibili o nascoste.

Nei casi estremi uno scienziato o un gruppo di ricerca possono mettere in piedi un'intera rivista *on line* per pubblicarvi i propri studi. In casi più ambigui ci sono invece forme di auto-plagio che sono prodotti collaterali della quantificazione. Per esempio un ricercatore può ripubblicare lo stesso studio con piccole modifiche in diverse riviste, aumentando il numero di pubblicazioni ma non la loro qualità. Naturalmente ci sono forme di ripubblicazione che non sono scorrette, per esempio quelle che fanno circolare un lavoro in lingue o comunità scientifiche diverse, e tracciare il confine è difficile.

Ci sono comportamenti non corretti anche da parte di riviste che pubblicano ricerca affidabile?

Di recente abbiamo saputo dell'esistenza di gruppi di riviste che formano cerchie che si accordano per scambiarsi *peer review* e citarsi a vicenda: anche le riviste sono soggette a pressioni per aumentare il proprio *impact factor*. Le riviste con impatto basso possono essere chiuse dall'editore o abbandonate dalle biblioteche, e quindi devono giocare con le regole. In molti casi si tratta di pratiche creative e aggressive ma accettabili, a volte invece ci sono modalità più sospette.

Qual è il ruolo delle classifiche globali usate per valutare le prestazioni delle università?

Molti atenei lavorano con statistici che decidono come presentare i propri dati per adattarli, o almeno massimizzarne la simbiosi con i parametri usati da alcuni *ranking* diventati importanti, come quello del Times Higher Education o lo Shanghai Ranking. Non voglio criminalizzare questi comportamenti ma pongo la questione: se un economista, scienziato o sociologo adatta i suoi dati di ricerca per renderli più appetibili si parla di frode; non dovrebbe essere lo stesso per le università?

Quali strumenti abbiamo per capire che cosa siano oggi la frode o la cattiva condotta?

Il problema filosofico della distinzione tra comportamenti accettabili e non accettabili non è di facile soluzione. In passato il problema era limitato alla produzione del falso, insomma una distinzione strettamente filosofica: vero contro falso. Le nuove forme di cattiva condotta aggiungono un raggio molto ampio di problemi che sono analizzabili piuttosto in termini sociologici o istituzionali, perché spesso non hanno niente a che fare con la verità. Si violano norme sociali, non epistemologiche. Inoltre occorre una valutazione seria della qualità della ricerca, che affianchi le eventuali misure quantitative.

Due esempi. Il britannico Andrew Wakefield, autore di una delle più gravi frodi in ambito scientifico, la correlazione tra vaccini e autismo, risultata infondata e in realtà costruita a tavolino. Sotto, una ricostruzione dell'uomo di Piltdown, altro esempio di falso scientifico.



di Letizia Gabaglio

L'impianto elettrico 2.0

Lo spin-off Over ha messo a punto un sistema che permette di monitorare o azionare con computer, tablet e smartphone ogni apparecchio o presa elettrica

Proprio come nella realizzazione di un impianto elettrico, per raggiungere il suo obiettivo Adriano Cerocchi ha dovuto unire tutti i «punti luce»: mettere insieme e dare corpo alle diverse esperienze che studio e vita gli avevano fatto toccare con mano. Durante il dottorato in ingegneria informatica alla «Sapienza» Università di Roma aveva partecipato al progetto europeo SM4all, iniziato nel 2008 con l'obiettivo di realizzare una piattaforma innovativa per la domotica. A questo andava aggiunta però una competenza appresa sul campo per il fatto di essere il figlio di un elettricista, e la passione per il commercio, coltivata da molti anni. «È mettendo insieme tutti questi ingredienti che è stato possibile realizzare OBox, una scatola intelligente capace di controllare la casa e di far risparmiare elettricità», spiega l'ingegnere.

Già, perché il televisore anche da spento consuma energia, come il router, quando per esempio non c'è nessuno in casa o tutti dormono, e le lampadine hanno un consumo spesso maggiore di quello dichiarato. Insomma, in ogni casa ci sono margini di risparmio ampi. Basta avere un sistema che analizza la situazione ed elabora una soluzione. Proprio quello che fa il sistema Over.

Un primato nazionale

Oggi l'azienda vende su tutto il territorio italiano un sistema facile da installare e da usare, che misura l'impiego di elettricità di ogni presa presente in casa e che, sulla base di queste misurazioni, propone all'utente un uso più «intelligente» di elettrodomestici e luci, con un risparmio stimato del 30 per cento sulla bolletta. «Arrivare a questo punto ha voluto dire passare da una mentalità di ricerca a una di business: il ricercatore pensa al prodotto, l'imprenditore al mercato; l'ingegnere è soddisfatto quando arriva ad avere in mano l'oggetto che ha disegnato e sviluppato, ma se l'obiettivo è venderlo allora non si è che al 20 per cento del cammino. Il restante 80 per cento riguarda il mercato, ed è la parte più difficile», spiega Cerocchi, che a 29 anni è l'amministratore delegato del primo *spin-off* dell'ateneo romano a essere diventato SpA, Over Technologies. Un primato a livello nazionale.

Già durante gli anni del dottorato l'ingegnere partecipa a una competizione per idee innovative con quello che potrebbe essere chiamato il precursore del sistema Over. «Il progetto si chiamava Micrometer, e conteneva l'idea che è la chiave dell'attuale sistema: la possibilità di effettuare misurazioni a livello microscopico», va avanti Cerocchi. Il giovane ricercatore non vince, ma arriva fra i 32 finalisti su migliaia di partecipanti. Non demorde, e decide di frequentare un corso in *business administration* organizzato dalla sua università. «È stato fondamentale per me, perché è lì che mi è stato insegnato a vedere il mondo con occhi diversi, e a considerare la variabile tempo come fondamentale per la buona riuscita di un progetto», sottolinea l'amministratore delegato. Fin qui ci

LA SCHEDA

Over Technologies

 Fatturato
n.d.

 Investimenti in ricerca
300.000 euro

 Dipendenti/collaboratori
8 di cui 8 impiegati in R&S

 Brevetti rilasciati
1





Dall'ateneo al mercato. Alcuni giovani ricercatori di Over Technologies, spin-off della «Sapienza» Università di Roma che a ottobre 2014 è diventato una Società per azioni.



1000

sono lo studio e l'anima imprenditoriale di Cerocchi, ma a fare la differenza e dare concretezza all'idea sono le competenze acquisite lavorando fianco a fianco con il padre elettricista.

Prende corpo così il progetto finale, quello di un sistema capace di controllare ogni due secondi il consumo di ogni presa elettrica e di trasmettere tutte le informazioni in maniera continua alla centrale, che le elabora e capisce dove sono gli sprechi. «La nostra soluzione di *smart house* è diversa da tutte le altre in commercio proprio per questa capacità di leggere quello che accade realmente in ogni punto della casa, e non di analizzare i dati aggregati sui consumi. E di farlo praticamente in tempo reale, non a distanza di ore», spiega l'ingegnere. «Over spegne le prese che sono in *stand by*, disattiva le prese quando andiamo a dormire o usciamo di casa. Oppure accende la luce della cucina se apriamo il frigorifero, perché l'apertura della porta del frigo provoca l'accensione della luce interna che richiama più corrente alla spina».

Come leggere lo stand by della presa è il brevetto alla base di tutto il sistema Over, mentre il modo in cui trasmettere i dati rilevati è uno degli ostacoli maggiori che gli ingegneri hanno dovuto risolvere. Infatti gli OMeter, le piccole scatole inserite nell'impianto elettrico, devono inviare all'OBox, la centrale intelligente, fino a 100 megabyte di dati provenienti dalle prese a una velocità bassissima: 9,6 chilobyte al secondo, quattro volte più lenta di quella dei primi modem, per intenderci.

Il sistema Over sfrutta il cablaggio standard, e quindi può essere facilmente installato da un elettricista quando fa l'impianto. Il controllo avviene attraverso un *browser*, una soluzione che permette di dialogare con la propria casa da qualsiasi dispositivo, smartphone, tablet o PC. «Il livello di interazione è piuttosto elevato: per esempio si possono riconfigurare i comandi delle prese senza dover chiamare l'installatore, si può isolare una presa dal resto dell'impianto e accettare le proposte di risparmio che il sistema fa sulla base delle misurazioni», spiega Cerocchi.

Verso l'Europa

Nel 2012 i ricercatori che lavorano al progetto, insieme con la «Sapienza», che è a tutti gli effetti un azionista, decidono di fondere la società e di investire tempo e risorse per portare Over sul mercato: «Siamo partiti con un investimento di 100.000 euro, a cui ne abbiamo aggiunti altrettanti di tasca nostra. Il gruppo di sviluppo, uno tra i migliori in questo settore, ha messo a punto il prodotto in appena un anno e mezzo. A quel punto ci siamo sentiti pronti per cercare altri fondi e giocare la partita del mercato in maniera seria, diventando società per azioni», conclude Cerocchi.

Nel luglio 2014 si è concluso il primo round di finanziamenti, quello di start-up, e Over Technologies ha raccolto un milione di euro grazie all'investimento di un'azienda di distribuzione e di un fondo di venture capital. Sono i fondi che consentiranno all'azienda nata all'università di radicarsi nel mercato italiano. Ma nel cassetto di Cerocchi c'è già l'idea per arrivare con una soluzione innovativa da proporre sul mercato europeo, e aggiungere così un nuovo tassello al suo progetto.

di Telmo Pievani

è professore associato di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

La questione del linguaggio

L'evoluzione di questa caratteristica umana è al centro di un'accesa discussione

Da qualche tempo le riviste scientifiche più accreditate sono piene di articoli appassionati sull'evoluzione del linguaggio umano. Potremo mai spiegarlo come facciamo con un occhio o con la coda del pavone, cioè tratti complessi evolutisi per selezione rispettivamente naturale e sessuale? Un'antica *querelle* si protrae dai tempi di Darwin (ottimista sulle possibilità di una spiegazione evoluzionistica della mente umana) e Wallace (alquanto pessimista). Il problema attuale è che il dibattito è ingessato attorno a due posizioni rigide, che sembrano ignorare gli sviluppi più interessanti della ricerca sul campo.

Da una parte, gli scettici, secondo cui il linguaggio resterebbe un insondabile mistero evoluzionistico, come recitava il titolo di un controverso articolo di maggio 2014 su «Frontiers in Psychology», a prima firma di Marc Hauser, con il contributo fra gli altri di Noam Chomsky, Richard Lewontin e Ian Tattersall. La tesi era forte: in fatto di capacità linguistiche, il gap che ci separa dagli altri animali non è stato minimamente colmato negli ultimi quarant'anni di ricerche. Un fallimento totale su quattro fronti: negli inconcludenti studi comparativi sulla comunicazione in animali non umani; nei frammentari indizi paleontologici e archeologici; nella genetica del linguaggio; nella vaga modellizzazione matematica di processi evolutivi. Conclusione: il linguaggio umano in senso stretto (cioè la sintassi ricorsiva) è un Rubicone ancora inafferrabile. Peccato che l'articolo non riportasse in bibliografia gli studi più recenti e più convincenti in ciascuno di quei campi, dalla paleo-neurologia all'archeologia cognitiva, dall'anatomia comparata alla trascrittomatica. Un'omissione alquanto sospetta, per mettere in luce l'eccezionalità della grammatica universale umana.

Dall'altra parte, presi di mira dai primi, ci sono gli adattazionisti, quelli convinti che il linguaggio sia solo un istinto come gli altri o un modulo gradualmente evoluto per selezione naturale come "adattamento per" funzioni generali di comunicazione. A costoro pare proprio impossibile che non vi sia stata una costante e lenta pressione selettiva che nel corso del Pleistocene avrebbe implementato questo nostro formidabile organo. Hanno messo alla prova tutte le ipotesi (intelligenza sociale crescente, caccia, manipolazione di artefatti), ma finora la savana africana è stata avara di evidenze empiriche: tutte belle storie plausibili, pochi dati certi.

Ma siamo davvero condannati a scegliere tra una misteriosa discontinuità del fenotipo del linguaggio umano e un'evoluzione adattativa disperatamente lunga il cui inizio funzionale era già presente in rane e passerotti? La dicotomia è perfetta per lo stile dei nostri mezzi di comunicazione, oltre che per le chiacchieire da bar dei blog. Così gli stessi protagonisti sembrano prenderci gusto, e in questi mesi la polemica è proseguita su «PLoS Biology» con l'interessante botta e risposta fra Tattersall, Chomsky, Johan Bolhuis, Robert Berwick, dalla parte di un'evoluzione recente e improvvisa delle capacità sintattiche umane, e Philip Lieberman dalla parte di una lenta evoluzione adattativa.



Non solo voce. Cartelli e insegne luminose a Times Square, a New York, che comunicano divieti, indicazioni stradali e informazioni riguardanti aziende quotate in borsa.

Per uscirne c'è una sola strada: ripartire dalle prove che si accumulano e accorgersi che il programma di ricerca neodarwiniano è più articolato di quanto pensano i due contendenti. Il linguaggio, per esempio, potrebbe non essere un tratto, ma un mosaico di tratti: alcuni filogeneticamente più antichi e gradualmente evoluti; altri più recenti, tipici della nostra specie e frutto di cooptazioni funzionali o effetti collaterali. La regolazione dello sviluppo sembra aver avuto un ruolo, come la biogeografia e l'ecologia instabile che hanno caratterizzato la diversificazione delle specie del genere *Homo* fino a tempi recenti. Il linguaggio umano è speciale, ma l'evoluzione darwiniana ci insegna che non c'è niente di speciale nell'essere speciali.



di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

I fringuelli di Darwin

Sequenziati i genomi delle specie di uccelli protagonisti della teoria dell'evoluzione

Poco meno di 200 anni fa il naturalista britannico Charles Darwin iniziò a pensare a come si fossero potute venire sulla Terra tante specie animali e vegetali diverse, e se tutto questo avesse alle spalle una storia che si potesse raccontare. Quella che sarebbe poi divenuta la teoria dell'evoluzione cominciò a prendere forma sulla base di diverse osservazioni e riflessioni, ma una delle meglio documentate è la raccolta e la classificazione delle diverse specie di fringuelli delle isole Galápagos, a ovest della costa ovest del Sud America. Si tratta di 13 isolette relativamente vicine e distanti 1000 chilometri dalla costa continentale più prossima, quella dell'attuale Ecuador. L'unicità di queste specie e la loro incredibile varietà – vi si contano ben 14 specie diverse – suggerirono a Darwin alcuni possibili meccanismi attraverso i quali tutto ciò potesse essere avvenuto e soprattutto lo persuasero definitivamente del fatto che le specie non erano state sempre le stesse, ma avessero sperimentato una serie ordinata di cambiamenti nel tempo, si fossero cioè evolute, come si disse da allora.

Una prima ipotetica coppia di fringuelli era giunta su una delle isolette provenendo dal continente. Data la distanza, era rimasta poi isolata dal continente stesso e aveva colonizzato le diverse isole adattandosi al meglio in ogni circostanza alle condizioni ambientali trovate. Nessun suo membro è divenuto un toporagno, e nemmeno un'aquila, ma la colonizzazione ha generato appunto una varietà di specie diverse, che differiscono per vari caratteri tra cui la forma del becco. Ci sono fringuelli con un becco grosso e tozzo, adatto a schiacciare semi e insetti coriacei, e fringuelli con un becco più lungo e appuntito, adatto a succhiare la polpa e il succo delle piante di cactus, nonché a catturare piccoli insetti.

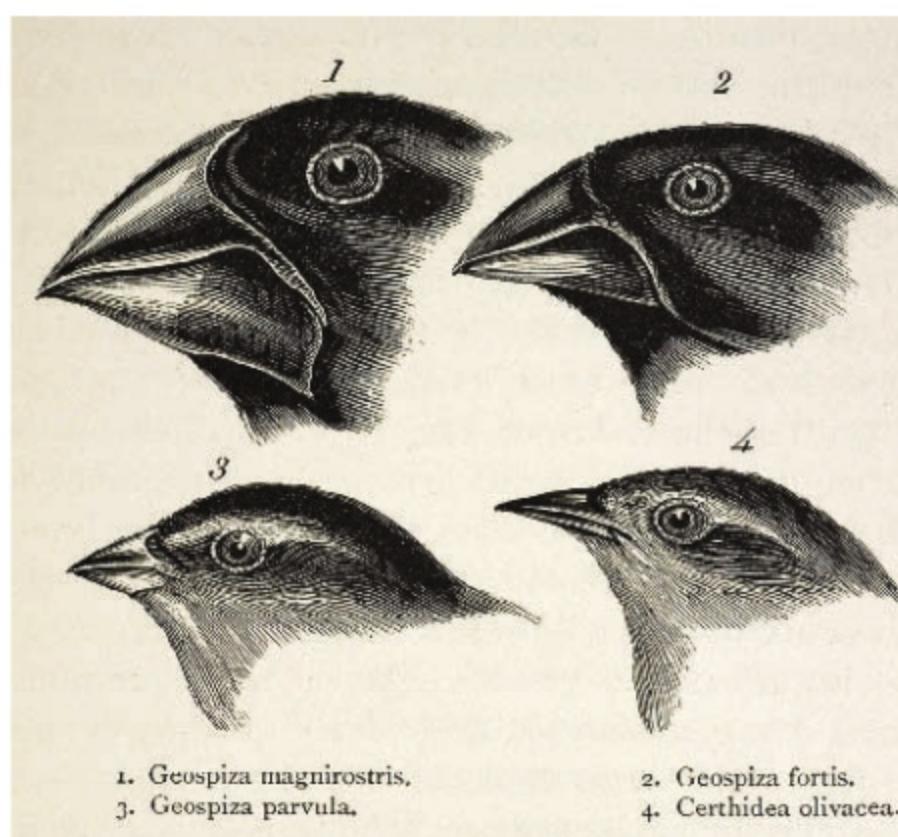
Quella dei fringuelli delle Galapagos, rinominati successivamente fringuelli di Darwin, è una delle storie più interessanti della biologia e si presta a illustrare mirabilmente la teoria dell'evoluzione biologica, attraverso un processo di continua produzione di varianti e dell'affermazione di alcune di quelle, grazie alla selezio-

ne naturale, che offre un'abbondanza di prede ad alcune e una via via più difficile discendenza ad altre.

Adesso, in piena era della genomica, si sono potuti analizzare i genomi delle diverse specie (si veda Lamichhaney S. e collaboratori, in «Nature», Vol. 518, pp. 371-375). Sono stati confrontati gli interi genomi di 120 esemplari, appartenenti alle specie delle isole, a una specie delle vicine isole Cocos e a due specie caratteristiche dei Caraibi, cercando di metterli in relazione con le caratteristiche esterne e visibili, cioè con i loro rispettivi fenotipi. In questo modo sono state individuate 15 regioni genomiche principali, che adesso andranno studiate a fondo. Fra queste spicca comunque la

regione del gene *ALX1* che codifica per un fattore trascrizionale e che nell'essere umano può essere responsabile di una palatoschisi e di altre malformazioni cranio-facciali. Le due forme alleliche principali del gene *ALX1* correlano con la forma del becco, tozzo oppure allungato. Le osservazioni naturalistiche si saldano così con i dati molecolari e contribuiscono a fornire, se ce ne fosse stato bisogno, un fondamento indiscutibile alla teoria dell'evoluzione biologica. Darwin ne sarebbe certamente felice.

L'intero processo si è svolto nell'arco di cinque milioni di anni, ma l'attuale studio ha portato anche un altro contributo inatteso, mostrando un evento evolutivo molto più rapido. Negli anni ottanta del secolo scorso le isole furono colpiti da una



Ritratti passati. Illustrazione dei fringuelli di Darwin pubblicata nel 1845 e opera dello stesso naturalista britannico, il quale aveva osservato e studiato questi uccelli dieci anni prima.

tremenda siccità e le condizioni ambientali divennero quasi proibitive. Si osservò allora un grande aumento della variabilità nelle popolazioni di fringuelli. Ebbene, l'analisi genomica ha mostrato che quella che si riteneva una sola specie, definita *Geospiza fortis*, si è evoluta in tre specie diverse, portando l'attuale numero delle specie a 17. Questa rapidissima triplicazione di una specie ha richiesto in realtà pochi anni, un evento raro che si può spiegare solo con la presenza di una pressione evolutiva altissima, accompagnata a una vivace effervesienza genetica. Così anche i fringuelli sono passati definitivamente alla storia. Vediamo ora che cos'altro si inventeranno i creazionisti e i sostenitori del cosiddetto *intelligent design*.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)



Un ricordo di Georg Kreisel

Scomparso un mese fa, ebbe un grande influsso sulla logica matematica

Il 1° marzo è morto a Salisburgo Georg Kreisel, «il miglior filosofo che fosse anche un matematico». Se il giudizio può sembrare apodittico, non va comunque preso con leggerezza: è infatti di Ludwig Wittgenstein e fu emesso nel lontano 1944, quando Kreisel aveva solo 21 anni.

Benché austriaco, Kreisel era emigrato in Inghilterra per le sue origini ebree, e durante la guerra aveva lavorato all'Ammiragliato. In quel periodo divise la camera con un collega, che divenne poi uno dei pochi amici che mantenne per tutta la vita: si chiamava Francis Crick, e nel 1953 avrebbe vinto il Nobel per la scoperta della struttura del DNA. Kreisel è citato un paio di volte nel libro di James Watson *La doppia elica* (pubblicato in Italia da Garzanti), che lo descrive come colui al quale Crick si rivolgeva quando era in difficoltà matematiche, e come un uomo che non sopportava lo *small talk*.

Non è dunque un caso che abbia cercato, e ovviamente trovato, la compagnia dei «ricchi e famosi»: compresi i miliardari come gli Agnelli e le attrici come Brigitte Bardot. E non stupisce anche che abbia alimentato, passivamente e attivamente, innumerevoli gossip tra i matematici, avvezzi a frequentare tutt'altri ambienti, o a non frequentarne nessuno.

Fin da studente a Cambridge il giovane «matematico-filosofo» divenne il confidente di Wittgenstein, che nelle sue passeggiate testava su di lui le teorie poi pubblicate in *Zettel* e in altri libri postumi. In quel periodo fu anche amico di un altro *enfant terrible*, Freeman Dyson, al quale finì col rubare la moglie, che in seguito presentava poco signorilmente come: «Mia moglie, la signora Dyson». Sempre a Cambridge conobbe bene la scrittrice Iris Murdoch, che gli dedicò poi un libro e lo prese a modello per il protagonista di un altro.

In un biennio passato a Parigi nei primi anni sessanta, Kreisel frequentò Raymond Queneau, che viene citato come *editor* nell'introduzione del suo libro *Elementi di logica matematica*, scritto con Jean-Louis Krivine. La cosa non stupisce, visto che l'Oulipo fondato dallo stesso Queneau mirava appunto a far collaborare letterati e matematici, anche se di solito la collaborazio-

ne avveniva nella direzione opposta a quella sfruttata da Kreisel.

Quando approdò negli Stati Uniti divenne professore a Stanford, ma era di casa all'Institute for Advanced Study di Princeton, dove divenne questa volta confidente di Gödel. Sfruttando la comune origine austriaca e la chiusura caratteriale, Kreisel si assunse l'onore e l'onore di fungere da «messaggero» tra i comuni mortali della divinità logica del Novecento. E il suo necrologio di Gödel per la Royal Society, di cui erano entrambi membri, rimane un capolavoro di esposizione dei risultati di quest'ultimo.

Ma al di là dei pettegolezzi generati dalle sue frequentazioni inusuali, e della mitologia alimentata dalla sua amicizia e dalle sue conversazioni con Wittgenstein e Gödel, Kreisel ebbe un grande influsso sulla logica matematica. Anche se amava essere e rimanere oscuro, con la scusa che «la chiarezza è una distrazione»: una frase che un famoso logico, seccato dalle provocazioni di Kreisel, una volta gli consigliò di conservare come epitaffio.

Che però ci fosse qualcosa di vero in essa lo dimostrò lo stesso Kreisel con il suo *unwinding program*, ovvero un «programma di srotolamento», che consisteva nel prendere dimostrazioni classiche, dunque apparentemente «chiare», e nell'estrarre da esse informazioni costruttive nascoste. Ma per poterlo fare bisognava sporcarsi le mani con l'alta matematica, e pochi riuscirono a superare il lavoro che egli stesso fece, analizzando per esempio la soluzione di Artin del diciassettesimo problema di Hilbert.

A un livello più elementare, a prima vista la dimostrazione dell'esistenza di infiniti numeri primi di Euclide è diretta e costruttiva: dato un numero finito di numeri primi, fornisce esplicitamente un limite al prossimo. La dimostrazione di Eulero, invece, è indiretta e classica, e si basa sull'apparentemente irrilevante divergenza della serie armonica. Eppure, se opportunamente «srotolata», fornisce limiti migliori e più efficienti della precedente. A riprova del fatto che, come Kreisel ci ha insegnato, se non ci accontentiamo di quello che ci piace a priori possiamo trovare a posteriori qualcosa che ci piace di più.



Oltre la filosofia. Kreisel a una conferenza. Di lui Wittgenstein disse che era il miglior filosofo che fosse anche un matematico.



di Amedeo Balbi

Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica
dell'Università di Roma Tor Vergata

Buon lavoro, Dawn

La sonda della NASA ha raggiunto Cerere e ora inizia l'investigazione scientifica

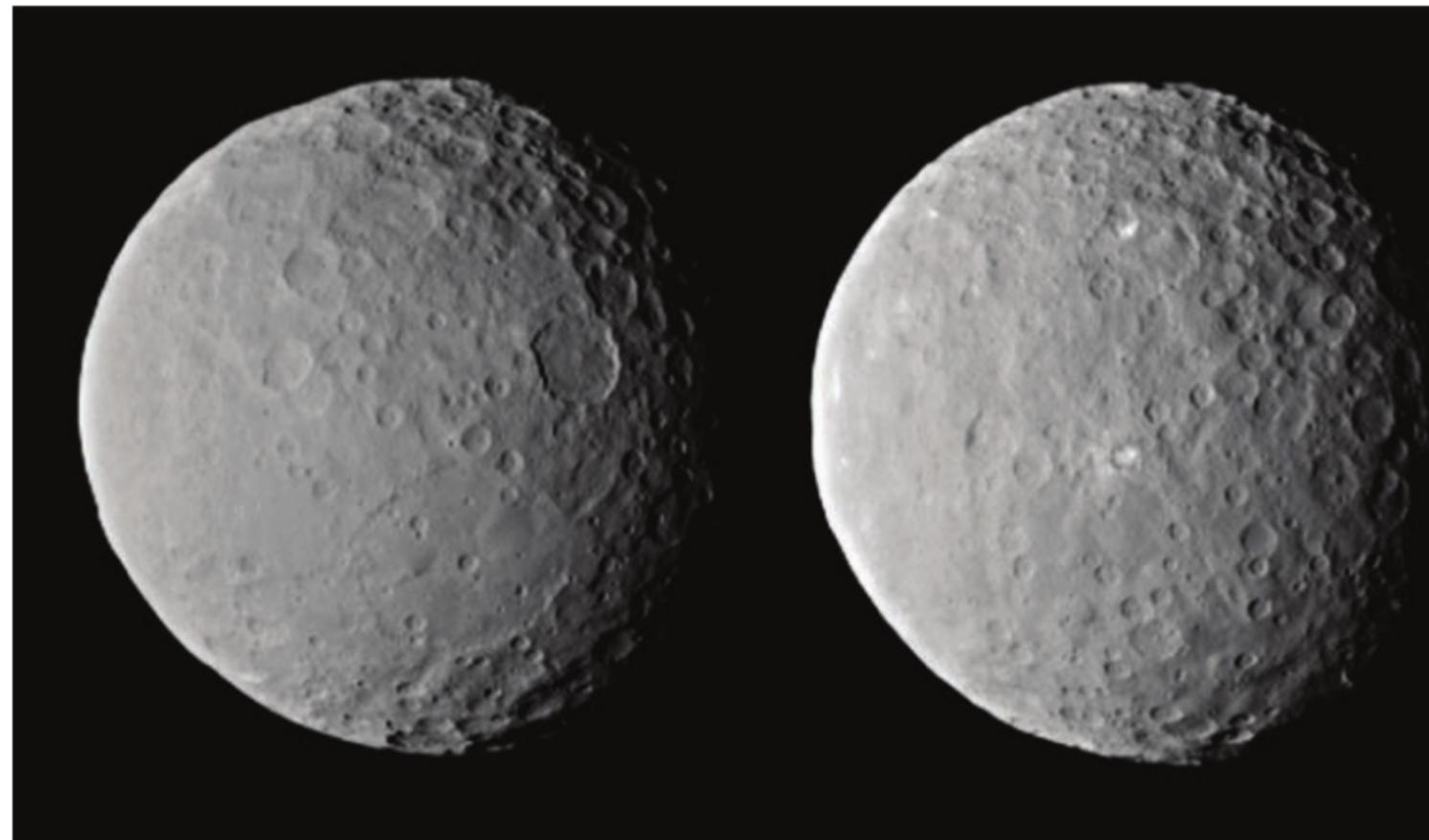
Stiamo vivendo un periodo interessante per l'esplorazione del sistema solare. A pochi mesi dall'arrivo di Rosetta e Philae sulla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, un altro veicolo spaziale ha raggiunto con successo un piccolo mondo finora inesplorato: il 6 marzo la sonda Dawn della NASA è entrata in orbita attorno a Cerere, il più grande oggetto della fascia di asteroidi tra Marte e Giove, di fatto un pianeta nano: la stessa categoria in cui è stato «retrocesso» Plutone dopo la nuova definizione di pianeta stabilita nel 2006 dall'Unione astronomica internazionale. In effetti, quando Cerere fu scoperto (nel 1801, dall'astronomo italiano Giuseppe Piazzi), fu ritenuto un pianeta, e come tale continuò a essere classificato, con tanto di simbolo astronomico, fino a metà dell'Ottocento. Insomma, questo piccolo oggetto si è visto affibbiare nel giro di un paio di secoli almeno tre diverse identità.

Ma non sono certo le questioni di nomenclatura a rendere interessante Cerere e la missione Dawn. Intanto c'è il puro fascino dell'ignoto ed è emozionante rendersi conto che ancora oggi ci sono mondi del nostro sistema planetario che non abbiamo mai visto da vicino. Non avevamo foto decenti di Cerere prima che Dawn iniziasse la sua marcia di avvicinamento. Abbiamo quindi potuto assistere, giorno dopo giorno, alla trasformazione di una macchia sfocata nell'immagine di un nuovo mondo, scoprendo poco a poco dettagli della sua superficie che nessuno aveva mai potuto vedere prima.

Anche dal punto di vista tecnico, Dawn è stata una novità nel campo dell'esplorazione spaziale. Lanciata nel 2007, è la prima sonda entrata in orbita attorno a due diversi corpi del sistema solare. Nel 2011 Dawn aveva visitato Vesta, il secondo oggetto in ordine di massa della fascia di asteroidi, girandoci attorno per 14 mesi prima di ripartire. La cosa è stata possibile perché Dawn sfrutta un innovativo sistema di propulsione a ioni, che le permette di dirigersi autonomamente da una destinazione all'altra, piuttosto che limitarsi a cambiare rotta con la sola assistenza della gravità. Solo un guasto a due dei volani le impedirà di tentare l'approccio a un terzo possibile obiettivo, l'asteroide Pallade. Dawn resterà un satellite artificiale di Cerere, fino a quando la stabilità dell'orbita lo consentirà.

Ora si entra nella fase cruciale della missione, quella dell'investigazione scientifica, a cui l'Italia contribuirà tra l'altro in modo

sostanziale: lo spettrometro a bordo della sonda, a guida scientifica Istituto nazionale di astrofisica, è stato fornito dall'Agenzia spaziale italiana e realizzato da Selex Galileo. Il principale motivo di curiosità nei confronti dei corpi della fascia di asteroidi è che rappresentano frammenti del materiale di costruzione da cui sono stati assemblati i pianeti del sistema solare, circa 4,6 miliardi di anni fa. Cerere, in particolare, è il mattone più grande, probabilmente un embrione planetario rimasto in giro da allora, e studiarlo permetterà di capire meglio le condizioni che regnavano in quei tempi remoti. La sua superficie nasconde sicuramente molti segreti, a cominciare dalle piccole macchie chiare emerse nelle



Vista doppia sullo stesso oggetto. Due immagini di Cerere scattate dalla sonda Dawn della NASA il 19 febbraio a una distanza di 46.000 chilometri da questo pianeta nano.

prime immagini ravvicinate. Ma l'interno non è da meno. Si pensa che, a causa della sua distanza dal Sole, Cerere possa aver trattenuto molta acqua sotto forma di ghiaccio, (fino al 30 per cento della sua massa, secondo alcune stime), e c'è persino l'affascinante possibilità che gli elementi radioattivi intrappolati nel pianetino possano fornire sufficiente calore da mantenere parte dell'acqua allo stato liquido: Cerere, come alcune delle lune dei pianeti giganti, potrebbe forse avere laghi, o addirittura oceani, sotterranei.

Buon lavoro a Dawn, dunque. E già che ci siamo, buon viaggio a New Horizons, la sonda che sta per raggiungere Plutone, un altro dei mondi ancora inesplorati del sistema solare. Ma di questo ripareremo tra qualche mese.

di Giorgio Manzi

Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»



Quel Neanderthal di Altamura

Primi importanti risultati per il celebre scheletro umano arcaico scoperto in Puglia

Spero che nessuno pensi a un conflitto d'interessi se, una volta tanto, parlo di una mia ricerca. Non solo «mia», certo: è il lavoro di un gruppo internazionale e interdisciplinare che si è raccolto intorno a due capofila, «Sapienza» Università di Roma e Università di Firenze, allo scopo di studiare una piccola porzione d'osso fossile appartenente al celebre scheletro umano «arcaico» di Altamura nell'Alta Murgia. La ricerca ha rivelato che l'uomo di Altamura presenta caratteristiche morfologiche e paleogenetiche che lo identificano come appartenente a *Homo neanderthalensis*, ma la stessa ricerca lo colloca cronologicamente in una fase antica dell'esistenza dei Neanderthal. I risultati costituiscono un fuoco di fila di prime volte: la prima pubblicazione scientifica a elevato impatto dovuta all'attuale ciclo di ricerche; la prima volta di una porzione di quello scheletro in laboratorio; la prima datazione assoluta; la prima indagine morfologica quantitativa; i primi dati paleogenetici... No, non è poco. Mentre scrivo è ancora in stampa sul «Journal of Human Evolution», rivista leader in paleoantropologia, ma forse voi ne avrete già sentito parlare su giornali e Web (in effetti, me lo auguro).

Vi avevo raccontato qualcosa dell'uomo di Altamura e della sua storia in occasione dei vent'anni dalla sua scoperta, avvenuta i primi di ottobre 1993 grazie all'intraprendenza di un gruppo di speleologi pugliesi (*si veda la rubrica di novembre 2013*). Lo trovarono adagiato come in una culla di calcare, in fondo alla grotta di Lamalunga, che loro stessi avevano scoperto e iniziavano a esplorare, a pochi chilometri dal centro di Altamura. Fra le ossa dello scheletro e le formazioni carsiche, ricoperto da una miriade di gocce di calcite, c'era quel cranio rovesciato che è diventata l'icona di una formidabile scoperta scientifica (ancor prima che speleologica): con le sue arcate sopraorbitali e le altre inequivocabili caratteristiche da uomo preistorico.

Solo nel 2009, a seguito dell'iniziativa congiunta di Direzione regionale per i beni culturali e paesaggistici e Soprintendenza archeologia della Puglia, un gruppo di esperti italiani ha potuto avviare un nuovo progetto di studio e riqualificazione. Mettendo in campo metodologie innovative e tecnologicamente avanzate, il gruppo di ricerca scaturito da quella commissione di esperti ha poi potuto prelevare dalla grotta (in condizioni di massima sicu-

rezza e assoluta sterilità) un primo reperto umano: una porzione della spalla, o meglio un frammento di scapola. Per quanto rappresenti solo una piccola porzione d'osso, le informazioni che ci ha potuto fornire sono notevoli. Fra le altre, le datazioni eseguite su vari frammenti di calcite con la tecnica dell'uranio-torio hanno indicato che le formazioni carsiche stratificate sullo scheletro hanno iniziato a deporsi fra 172.000 e 130.000 anni fa, nel pieno della penultima glaciazione quaternaria. A questo punto, nessun altro Neanderthal può eguagliare per antichità, completezza e stato di conservazione il reperto pugliese. A tutto ciò si aggiungono i risultati dell'analisi genetica, che hanno registrato la presenza di



Estrazione scapolare. La fase di campionamento dello scheletro di Altamura, una porzione della scapola destra, che è stata subito depositata in un contenitore sterile.

DNA endogeno, candidando l'uomo di Altamura ad analisi paleogenetiche di grande interesse.

Ora la strada è aperta e bisogna passare a ricerche più estese e approfondite: c'è molto da conoscere da un simile reperto paleoantropologico. Per farlo, bisognerà procedere alla rimozione almeno parziale delle ossa (in primo luogo il cranio), per poterle studiare con le più moderne metodologie non invasive, naturalmente solo dopo che lo stato attuale dello scheletro sarà stato accuratamente documentato con tecniche laser 3D e reso riproducibile. L'obiettivo è uno solo: combinare la conoscenza scientifica con la tutela di questo straordinario patrimonio e con la sua piena valorizzazione.

SOCIETÀ

Clima da guerra in Siria

Tra le cause del conflitto che devasta il paese c'è anche il riscaldamento globale



Distruzione.

Soldati dell'esercito regolare siriano per le strade di al-Khalidieh, vicino alla città di Homs, a luglio 2013. Da marzo 2011 in Siria è in atto una guerra civile che finora ha provocato oltre 200.000 morti.

«**Tra i fattori che hanno contribuito** alla guerra in Siria ce n'è uno devastante ma largamente ignorato: il cambiamento del clima». Shahrzad Mohtadi, giovane studiosa di scienze politiche alla Columbia University di New York, lo sosteneva sul «Bulletin of the Atomic Scientists» già nel 2012. Ora la sua idea trova conferma in uno studio guidato da Colin Kelley, geografo all'Università della California a Santa Barbara, e pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences».

Nel triennio precedente al conflitto, fra il 2007 e il 2010, la regione ha sofferto la siccità più intensa e protracta mai registrata da quando si hanno dati affidabili. Esaminando l'andamento storico, Kelley ha constatato che la siccità si inquadra in una tendenza in atto: nel Mediterraneo orientale la pressione atmosferica sta crescendo, facendo calare la piovosità invernale (-13 per cento dal 1931), mentre le temperature aumentano (oltre un grado in più dal 1900). Per i suoli è un doppio colpo: le minori precipitazioni invernali si sommano all'aumentata evaporazione estiva nel dissecarli. Ebbene, questa tendenza non trova spiegazioni apparenti in eventi naturali mentre coincide con quanto previsto dai modelli climatici. Il cambiamento climatico, conclude Kelley, ha reso una siccità simile da due a tre volte più probabile.

Il clima ovviamente è solo uno dei fattori che hanno fatto precipitare la situazione. Uno sfruttamento agricolo insostenibile del-

le acque sotterranee aveva depauperato le riserve che di norma tamponavano le emergenze. I raccolti crollati di un terzo, le morte di bestiame, la denutrizione infantile hanno costretto un milione e mezzo di persone ad abbandonare le campagne, sommandosi a oltre un milione di profughi iracheni nei sobborghi delle città, già sul punto di rottura in un paese passato in mezzo secolo da 4 a 22 milioni di abitanti. Qui gli sfollati si sono trovati abbandonati a se stessi dal governo, che non ha fatto nulla per aiutarli. Non sorprende allora che allo scoppio delle primavere arabe, nel 2011, questi sobborghi siano stati i maggiori focolai delle rivolte.

«Questo è il primo studio quantitativo approfondito che segnala non un rischio futuro ma un conflitto attuale legato al cambiamento del clima», ha dichiarato un altro autore, Richard Seager della Columbia University. «Si potrà obiettare che in una situazione così compromessa la guerra sarebbe scoppiata comunque, e non posso escluderlo. Ma quel che abbiamo mostrato è che non è andata così: nella catena di eventi osservata in concreto la siccità ha avuto un ruolo preciso, e il cambiamento climatico con ogni probabilità l'ha favorita».

Le occasioni di verifica purtroppo non mancheranno: l'aridità nella regione è destinata a crescere e in vari paesi il mix climatico e geopolitico fa pronosticare rischi analoghi.

Giovanni Sabato

Un'asimmetria da Higgs

Il campo associato al bosone avrebbe influito nell'asimmetria cosmica tra materia e antimateria

Un gruppo di fisici guidato da Alexander Kusenko, della Università della California a Los Angeles, potrebbe aver individuato la soluzione al problema dell'asimmetria cosmica fra materia e antimateria. L'idea, proposta in un articolo pubblicato su «Physical Review Letters», chiama in causa il bosone di Higgs e, in particolare, il fatto che il valore del campo associato a questa particella possa avere avuto un valore molto più alto nei primi istanti dell'universo, subito a ridosso del processo inflattivo, avvenuto una frazione infinitesima di secondo dopo il big bang. Secondo i ricercatori sarebbe proprio questo campo, che pervade tutto lo spazio conferendo massa alle particelle elementari, il responsabile del fatto che nell'universo attuale si osserva una netta preponderanza di materia rispetto all'antimateria, nonostante in origine queste potessero essere presenti in quantità uguali.

Kusenko e collaboratori partono dal dato definitivo sulla massa del bosone di Higgs, fissata a circa 126 gigaelettronvolt, ovvero circa 118 volte la massa del protone. L'intensità del campo di Higgs è quindi relativamente bassa, ragione per cui i ricerca-

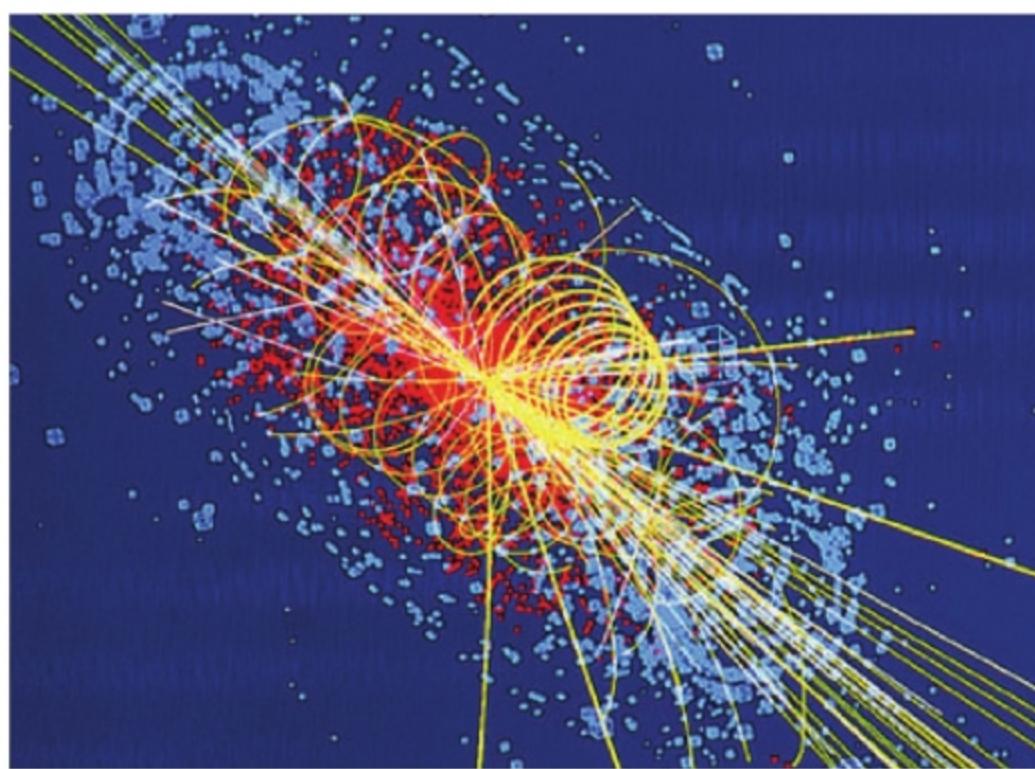
tori ipotizzano che il suo valore possa essere variato nel tempo. Partendo da un valore elevato al termine dell'inflazione e diminuendo nel corso del tempo, il campo di Higgs potrebbe avere introdotto un'anomalia che avrebbe reso più frequente la formazione di materia rispetto all'antimateria, per esempio conferendo

masse minori ai leptoni (cioè elettroni e neutrini) rispetto alle loro controparti di antimateria, e quindi richiedendo meno energia per la loro formazione. Il meccanismo teorico proposto dagli autori prevede anche il coinvolgimento del neutrino pesante di Majorana, antiparticella di se stesso, previsto teoricamente dal fisico italiano Ettore Majorana, appunto, ma ancora in attesa di conferme sperimentali.

In assenza di prove certe dell'esistenza di questa particella, Kusenko e colleghi

propongono un'alternativa per sottoporre a verifica sperimentale la loro ipotesi: le variazioni del campo di Higgs potrebbero aver generato particolari campi magnetici osservabili nell'universo attuale. La caccia è aperta.

Emiliano Ricci



L'entropia del microcosmo

Il secondo principio della termodinamica, che trova applicazione nei sistemi macroscopici, nel mondo dei sistemi microscopici non vale più. O, almeno, non vale più nella sua forma classica, ma richiede la formulazione di un nuovo insieme di «seconde leggi». A sostenerlo sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» è un gruppo di fisici guidato da Fernando Brandão, dello University College di Londra. Secondo la termodinamica classica, in un sistema isolato, cioè un sistema che non interagisce in alcun modo con l'ambiente circostante, e che quindi non ha scambi né energetici né di massa con questo, l'entropia può solo aumentare nel tempo o, al limite, rimanere costante. Questo significa che il grado di disordine di un sistema isolato, definito appunto dal valore dell'entropia, non può mai diminuire se non in presenza di interazioni fra sistema e ambiente. In pratica, se osserviamo diminuzioni locali di entropia, ovvero in presenza di sistemi che passano da uno stato disordinato a uno più ordinato, possiamo essere certi che l'entropia complessiva del resto dell'universo sta comunque aumentando. Fra le conseguenze del secondo principio c'è la quotidiana osservazione del fatto che il calore passa spontaneamente da un corpo caldo a un corpo freddo, ma per farlo scorrere nel verso opposto occorre consumare energia. Ebbene, se questo è vero per il mondo macroscopico, secondo Brandão non è altrettanto vero per i sistemi microscopici. In particolare, per i sistemi composti da un numero ridotto di particelle, il secondo principio della termodinamica, che è di natura statistica, deve cedere il passo a una nuova famiglia di leggi sull'entropia. Per esempio, prova di questo sono le osservazioni di sistemi microscopici che passano spontaneamente a stati più ordinati, ovvero a valori più bassi dell'entropia, anche solo in presenza di interazioni minime con un altro sistema. Uno studio teorico che potrà avere ricadute nella progettazione di sistemi operanti a scale microscopiche.

Emiliano Ricci



FISICA

Come non far rovesciare il caffè

Un trucco che sfrutta la fluidodinamica può rivelarsi utile per il trasporto di liquidi pericolosi



Una tazza troppo abbondante, un po' di sonolenza, e il rischio di rovesciare il caffè a colazione è una possibilità concreta. Eppure, se questo disastro mattutino è dietro l'angolo, c'è un modo semplicissimo per evitarlo. Basta aggiungere un po' di schiuma di latte, secondo uno studio effettuato alla Princeton University e al Centre National de la Recherche Scientifique. Un gruppo di ricercatori ha infatti studiato la propagazione delle onde meccaniche nei fluidi, mostrando che la schiuma può attutirle notevolmente, come si può vedere in un boccale di birra. Il lavoro, pubblicato su «Physics of Fluids», aiuta a capire meglio le leggi della fluidodinamica e suggerisce un metodo più sicuro per il trasporto di liquidi pericolosi.

Per studiare il fenomeno, gli scienziati hanno costruito un apposito apparato, formato da un recipiente rettangolare sottoposto a impulsi singoli oppure a oscillazioni periodiche lungo una direzione. Nel recipiente sono stati introdotti acqua, glicerolo e detersivo per piatti, e in questa soluzione è stata iniettata aria per crea-

re vari strati di schiuma con bollicine grandi tre millimetri. Una semplice attrezzatura, con cui gli autori hanno osservato che già cinque strati di schiuma bastano a ridurre di un fattore dieci l'altezza delle onde nel liquido. Questo avviene perché, secondo gli scienziati, la schiuma dissipà l'energia delle onde tramite l'attrito con le pareti del contenitore. Aumentare il numero di strati non migliora troppo la dissipazione, perché gli strati più in alto non si muovono e non generano attrito.

Naturalmente, le potenziali applicazioni di questo lavoro vanno ben oltre la birra o le bevande della colazione. Pensiamo per esempio al trasporto di petrolio o gas liquefatti. Oscillazioni troppo forti possono infatti esercitare forze sulle pareti delle cisterne, rischiando di provocarne la rottura, ma sfruttando la schiuma si potrebbe ridurre questo problema in modo economico. Torniamo però alle applicazioni utili a tutti noi. Ovvvero, se al mattino siete un po' sbadati, fatevi un cappuccino invece del caffè.

Massimiliano Razzano

Elettroni al fotofinish

Misurare la corrente elettrica è facile, mentre osservare il moto dei singoli elettroni è un'impresa complessa. Ma grazie a uno studio effettuato alla Technische Universität di Vienna in collaborazione con istituti tedeschi, è stato possibile studiare la «corsa» degli elettroni nei metalli. Come discusso in un articolo pubblicato su «Nature», questo risultato sottolinea l'importanza di studiare la fisica su scale e tempi piccolissimi, un settore di ricerca che aiuterà anche la miniaturizzazione di componenti elettronici e fotonici.

Il punto chiave per raggiungere questo risultato è stato l'uso di impulsi laser brevissimi, nell'ordine dell'attosecondo, pari a un miliardesimo di miliardesimo di secondo. Gli autori hanno usato diversi strati di magnesio e tungsteno, colpiti dal laser in modo da liberare elettroni per effetto fotoelettrico. Un secondo laser è stato usato per creare un mini «fotofinish», che ha mostrato gli elettroni provenienti dal magnesio in vantaggio rispetto a quelli del tungsteno. Cambiando lo spessore dei metalli, gli scienziati hanno infine scoperto che il moto degli elettroni su queste scale nanometriche è balistico e si svolge su traiettorie quasi rettilinee, e che quindi i complessi processi di diffusione fra atomi non giocano un ruolo rilevante.

Massimiliano Razzano

Quel collegamento tra Amazzonia e Sahara

La sabbia sahariana trascinata dai venti rifornisce di fosforo fertilizzante la foresta amazzonica

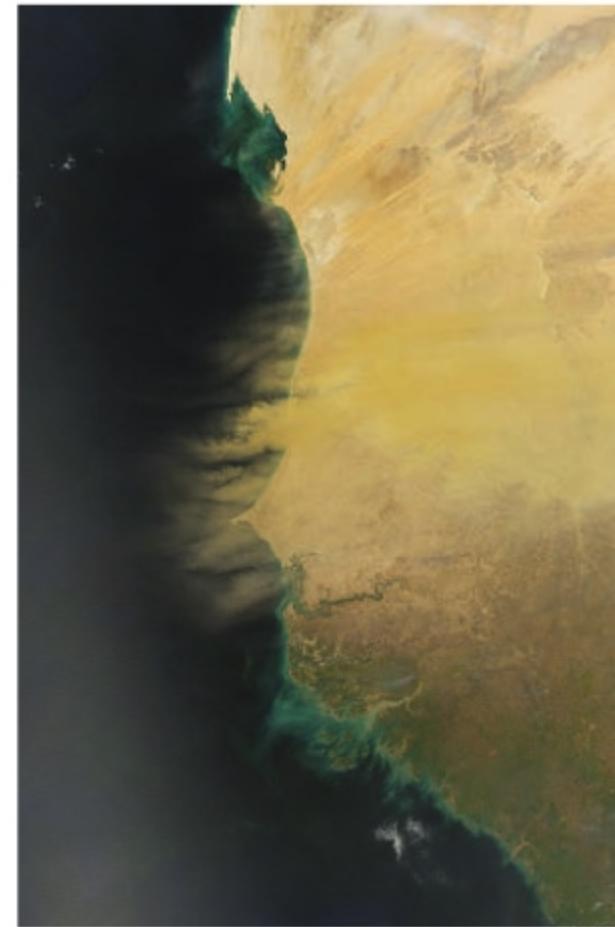
Quali territori sono più diversi della foresta amazzonica e del deserto del Sahara? Uno caratterizzato da una natura rigogliosa, l'altro da una siccità estrema. Entrambi con problemi, di tipo diverso, spesso dovuti all'azione dell'uomo. Ma la vita nasce e prospera sulla Terra anche grazie all'interconnessione delle varie parti del pianeta. Nessuno si aspetterebbe che il Sahel africano, a contatto con il Sahara, possa «dare una mano» all'Amazzonia. Invece è così.

Uno studio pubblicato su «Geophysical Research Letters» da Hongbin Yu, dell'Università del Maryland, ha mostrato che la sabbia sahariana trascinata dai venti in quota fino al continente americano porta una quantità di nutrienti che consente alla foresta amazzonica di ripianare le sue perdite. Nello specifico, il ricercatore ha usato dati del satellite CALIPSO della NASA, misure a terra e simulazioni modellistiche per stimare la quantità di fosforo portato dalle sabbie sahariane sull'Amazzonia. Il fosforo è il principale fat-

tore fertilizzante che influenza la crescita degli alberi nel bacino amazzonico, ma le piogge intense che si registrano ogni anno portano a una perdita di questo elemento che, se non venisse ripianata, potrebbe creare un deficit di sviluppo della foresta, se non problemi più gravi.

Usando dati che vanno dal 2007 al 2013, Yu ha mostrato che la sabbia sahariana porta 22.000 tonnellate all'anno di fosforo sull'Amazzonia, più o meno la quantità che questo bacino perde annualmente per le piogge. Certo, si osservano variazioni da un anno all'altro legate all'andamento dei venti e alle condizioni di siccità nel Sahel, dove il suolo può essere eroso e la sabbia immessa in atmosfera in quantità differenti. Sarebbe interessante avere previsioni per l'andamento di queste variazioni nel futuro, per sapere se questo «aiuto» del Sahara all'Amazzonia potrà continuare in condizioni climatiche mutate, ma questo è ancora oggetto di indagine.

Antonello Pasini



La prima misura diretta dell'impatto della CO₂ sull'effetto serra



Per la prima volta, grazie a scienziati del Lawrence Berkeley National Laboratory dell'Università della California, è stata effettuata una misurazione diretta della variazione del bilancio energetico della Terra in correlazione all'aumento della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera. La CO₂ è uno dei più importanti «gas serra», che cioè permettono al pianeta di mantenere un clima mite grazie alle loro proprietà: trasparenti alla radiazione solare in entrata, ma opachi alla radiazione infrarossa riemessa dalla superficie terrestre, di cui quindi trattengono il calore per effetto serra. L'aumento spropositato della CO₂ dovuto alle attività umane dalla rivoluzione industriale a oggi è stato indicato come la causa del riscaldamento globale ma, finora, solo sulla base di modelli teorici. I ricercatori di Berkeley, invece, hanno effettuato misurazioni dirette per il decennio 2000-2010 del «forcing radiativo», la variazione cioè del rapporto fra l'energia in arrivo dal Sole e il calore disperso nello spazio, e hanno notato che in entrambi i siti di osservazione (Oklahoma e Alaska) c'è stato un incremento della radiazione infrarossa di circa 0,2 watt per metro quadro e di 22 parti per milione per la CO₂. Come si legge su «Nature», questo prova la tesi per cui è proprio questo gas il responsabile dell'aumento dell'effetto serra, dimostrando anche che i modelli climatici attuali rappresentano in modo corretto il fenomeno. La raccolta dati è stata possibile grazie a sofisticati spettroscopi ad alta precisione, con i quali sono state monitorate le variazioni della firma dell'energia infrarossa propria dell'anidride carbonica. Lo studio ha permesso inoltre di osservare l'impatto della fotosintesi clorofilliana sul forcing radiativo, che è risultato in calo durante la primavera per il maggiore assorbimento della CO₂ da parte delle piante.

Marina Semiglia

BIOLOGIA

Prima ti allevo, poi ti riciclo

Scoperta una simbiosi in cui i batteri sono digeriti dagli stessi insetti che li ospitano

La linfa delle piante è ricca di zuccheri ma povera in amminoacidi e altre importanti molecole biologiche. Alcune specie di insetti parassiti che si nutrono di linfa vegetale hanno quindi imparato a evitare le carenze nutrizionali alleandosi con batteri che sintetizzano per loro le molecole mancanti. Questi batteri sono definiti endosimbionti perché vivono nelle cellule dello stomaco e delle ovaie dell'insetto. In cambio del loro aiuto, ottengono di vivere in un ambiente sicuro e con abbondanza di zuccheri. Uno studio pubblicato su «Current Biology» mostra però che quella che sembrerebbe un'associazione paritaria è in realtà governata dall'animale, capace di adattare il numero di batteri alle proprie esigenze nutritive durante tutto l'arco della sua vita.

Osservando le larve del genere *Sitophilus*, i ricercatori hanno notato che la popolazione di batteri nel loro stomaco è stabile durante gli stadi larvali, quando l'animale vive protetto all'interno di un chicco di cereale, ma cresce nei sei

giorni di metamorfosi che conducono allo stadio adulto. Questo è proprio il momento in cui l'attività dei batteri è più richiesta, poiché l'insetto necessita di amminoacidi aromatici in gran quantità per sintetizzare DOPA, un costituente essenziale dell'esoscheletro che gli permetterà di sopravvivere nell'ambiente esterno.

Dopo la metamorfosi, però, i batteri diventano un costo energetico inutile. DOPA, non più usata, diventa allora un segnale che induce meccanismi di morte cellulare programmata ed elimina quasi completamente gli endosimbionti. I batteri morti vengono quindi «digeriti» senza l'innesto di un'infiammazione permettendo all'insetto di recuperare e usare le molecole di cui erano composti. La popolazione batterica delle ovaie resta invece intatta, in modo da essere tramandata alla progenie. Il meccanismo potrà essere sfruttato per ideare nuove strategie di lotta contro gli insetti parassiti.

Elisa Dell'Aglio



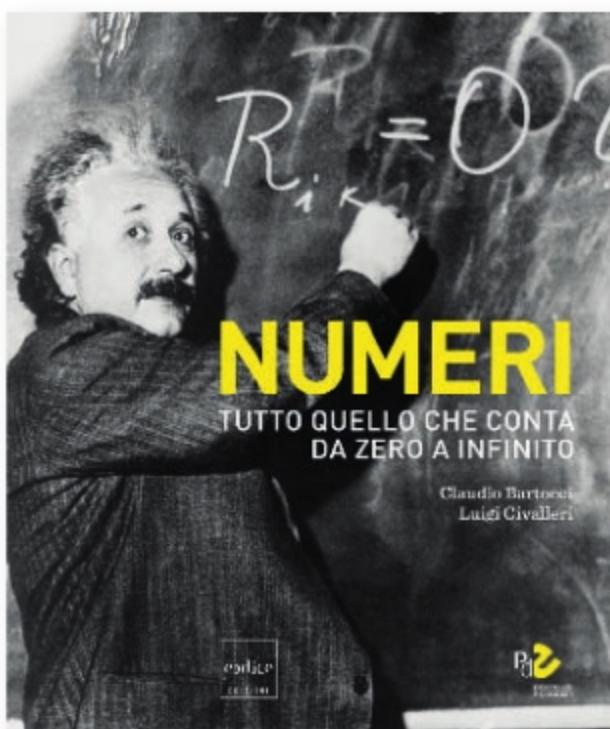
© Albert Lieal/Minden Pictures/Corbis

info@codiceedizioni.it
codiceedizioni.it

facebook.com/in.codice
twitter.com/codice_codice
pinterest.com/codice_codice

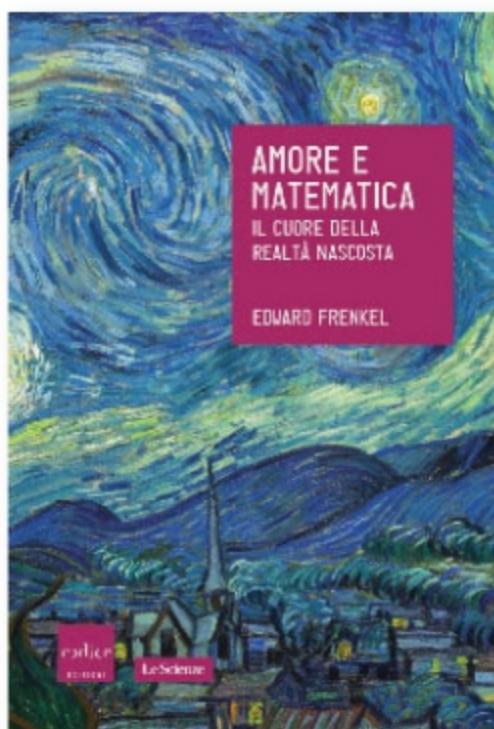


codice
EDIZIONI



CLAUDIO BARTOCCI
LUIGI CIVALLERI
NUMERI
TUTTO QUELLO CHE CONTA,
DA ZERO A INFINITO

PP. 280, EURO 25,00



EDWARD FRENKEL
**AMORE E
MATEMATICA**
IL CUORE DELLA
REALTÀ NASCOSTA

PP. 352, EURO 24,90

UN PERCORSO ALLA SCOPERTA DI UNA DELLE MASSIME ESPRESSIONI DELLA CULTURA UMANA: LA MATEMATICA.

CATALOGO DELLA MOSTRA AL PALAZZO DELLE ESPOSIZIONI, ROMA
(16 OTTOBRE 2014 - 31 MAGGIO 2015)

SE NON SIETE DEI MATEMATICI, QUESTO LIBRO VI FARÀ VENIRE VOGLIA DI DIVENTARLO.

NASSIM NICHOLAS TALEB

Alla ricerca dell'antenato perduto

Nuovi studi su reperti fossili confermano la complessità delle origini del genere *Homo*



Tre studi aggiungono nuove informazioni – ma non molta chiarezza – a un periodo cruciale della nostra evoluzione la cui documentazione fossile non brilla per linearità e completezza: le origini del genere *Homo*.

Una mandibola di 2,8 milioni di anni, scoperta in Etiopia dal team di Brian Villmoare, dell'Università del Nevada a Las Vegas, sembra essere il più antico fossile di *Homo*, anteriore di mezzo milione di anni rispetto al più vecchio finora noto. Villmoare non ha ancora dato un nome alla specie, sperando di trovare altri reperti che la definiscano meglio, ma spiega su «Science» che i denti piccoli e la forma della mandibola la collocano più vicina a *Homo* che agli australopitechi.

Fred Spoor, dello University College di Londra, ha invece digitalizzato e riassemblato al computer i frammenti schiacciati e distorti di un esemplare di *Homo habilis* di 1,8 milioni di anni, OH7, su cui la specie fu descritta mezzo secolo fa, per ricostruirne su «Nature» l'aspetto originale. *H. habilis* è il principale indiziato al ruolo di ponte fra gli australopitechi e gli *Homo* successi-

vi, ma i fossili ascritti a questa specie sono molto eterogenei, facendo pensare che all'epoca esistessero in realtà più specie umane.

La ricostruzione ha rivelato che la mandibola è più primitiva di quanto si pensasse, vicina a quella di australopiteco, e il cranio invece più grande, simile al successivo *Homo erectus*. Questo esemplare si scosta quindi più del previsto da altri attribuiti alla stessa specie, e insieme alla nuova scoperta di Villmoare conferma la varietà dei primi umani che popolavano l'Africa orientale, lasciandoci nell'incertezza su quante specie esistessero e quale fu la nostra antenata.

Una speciazione così vivace fra 3 e 2 milioni di anni fa, osservata anche fra gli australopitechi, è stata attribuita da alcuni a un cambiamento climatico che avrebbe trasformato la regione, costringendo i suoi abitanti ad adattarsi. Un'analisi delle ossa degli animali che popolavano l'area, pubblicata sempre su «Science» dal gruppo di Villmoare, conforta questa tesi, mostrando che in effetti vi fu una transizione dalla foresta alla savana.

Giovanni Sabato

Primi primati: già sugli alberi

Un importante ritrovamento fossile risalente a 65 milioni di anni fa, proprio durante l'estinzione di massa che ha coinvolto anche i dinosauri, fornisce preziose informazioni sulle prime fasi di evoluzione dei primati: si chiama *Purgatorius*, e appartiene all'ordine dei plesiadapiformi, un gruppo di mammiferi che si colloca alla base del ramo evolutivo che ha dato origine a tupaie e lemuri volanti, oltre che ai primati stessi.

La specie era già nota tramite ritrovamenti di denti e mandibole, da cui era stato possibile determinarne la dieta, probabilmente onnivora, a base di insetti e piccoli frutti. Per la prima volta, però, vengono ora descritte le ossa metacarpali degli arti inferiori, da cui emergono interessanti novità sull'ambiente in cui viveva.

Purgatorius aveva infatti una caviglia piuttosto mobile, simile a quella di molte attuali specie arboricole. È dunque plausibile che questa specie vivesse sugli alberi, anziché a livello del suolo come si credeva finora.

Considerando la posizione di *Purgatorius* alla base della linea evolutiva dei primati, è quindi probabile che l'adattamento alla vita sugli alberi abbia avuto un ruolo fondamentale nelle prime fasi di evoluzione del gruppo di mammiferi a cui apparteniamo, contribuendo in modo determinante al suo attuale successo ecologico.

Andrea Romano

GENETICA

Verso la decifrazione dell'epigenoma umano

Darà un quadro di riferimento per capire meglio malattie e funzioni fisiologiche fondamentali

Quando, 14 anni fa, fu pubblicata la sequenza del genoma umano, il commento ricorrente era che si trattasse tanto di un traguardo quanto di un nuovo inizio: il compito successivo era capire come quell'informazione è interpretata.

Il genoma è uguale in ogni cellula, ma produce tessuti diversi perché i geni sono accesi e spenti in modo differenziato, a causa soprattutto di certe molecole poste sul DNA e sulla cromatina circostante: le modificazioni epigenetiche. Era quindi cruciale mappare il profilo epigenetico delle diverse cellule.

Un'anticipazione era giunta nel 2012 dal progetto ENCODE, una mappatura dell'intero epigenoma di alcuni tipi cellulari, per lo più però linee di laboratorio. Sulla scia di quei progressi arriva ora l'esito di un piano molto più ambizioso: il Roadmap Epigenomics Project guidato dai National Institutes of Health statunitensi.

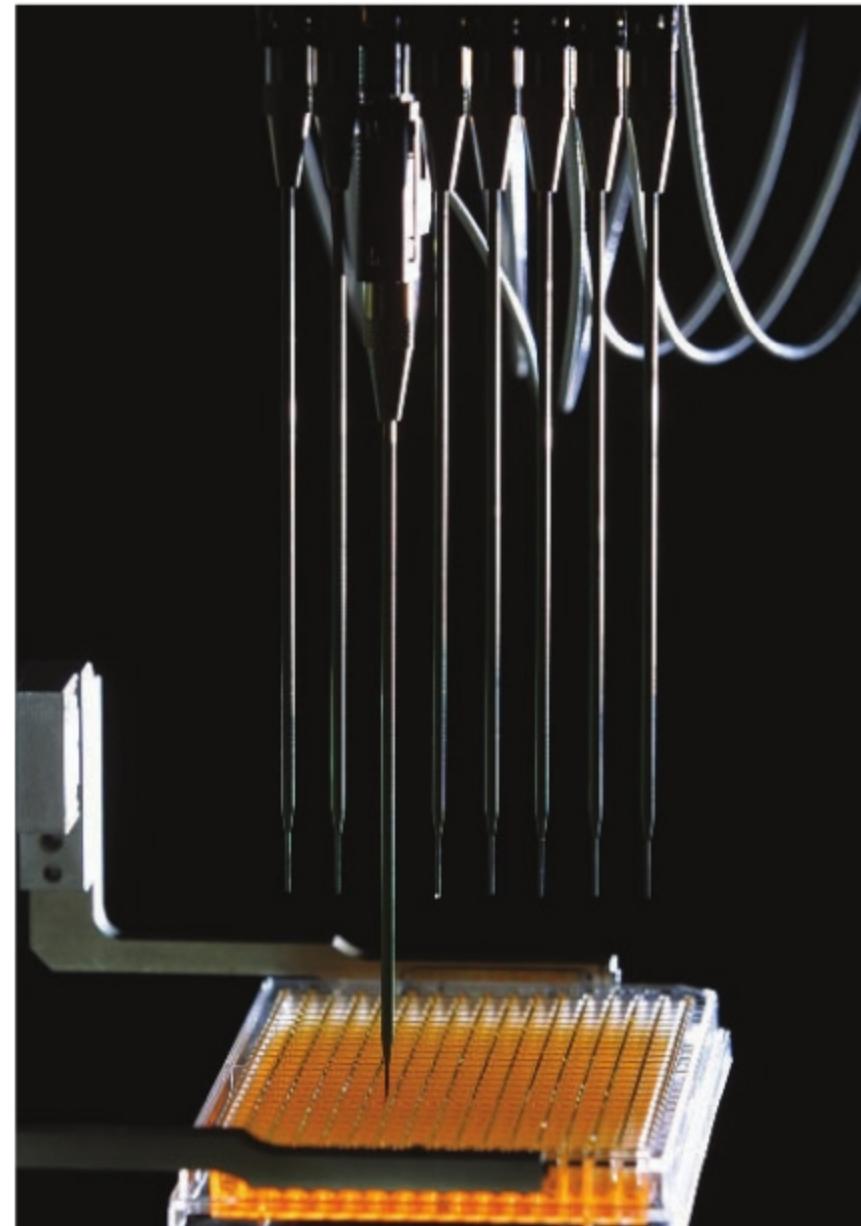
In 11 articoli pubblicati su «Nature» e altre riviste del gruppo (accessibili su www.nature.com/epigenomeroadmap), il progetto pubblica l'analisi di 127 tipi di cellule, da staminali in vari stadi di differenziamento a tessuti adulti sani e con malattie

come l'Alzheimer e alcuni tumori. Fra i risultati più generali c'è che di norma l'attività dei geni non è prevedibile da poche modificazioni ma dipende da un intreccio di modifiche che agiscono di concerto. Si stima che 20.000-40.000 sequenze regolatorie (*enhancer*) siano attive in ogni tipo cellulare per determinarne struttura e funzioni, coordinando l'espressione di metà dei 25.000 geni del genoma.

Quanto alle malattie, si è visto che il profilo epigenetico delle cellule tumorali conserva l'impronta del tipo cellulare d'origine, un dato oggi difficile da appurare nei tumori di organi complessi. I dati epigenetici saranno poi preziosi per capire che cosa fanno le tante sequenze che aumentano il rischio di una malattia ma non codificano per proteine, e hanno presumibilmente ruoli regolativi.

Ma anche stavolta, questa è solo una tappa. Ora bisognerà completare i profili per tutte le centinaia di tipi di cellule umane, e farlo in più individui in età e condizioni diverse, così da cogliere gli effetti del background genetico, degli influssi ambientali e dello sviluppo.

Giovanni Sabato



I geni che fanno espandere il cervello

Una delle caratteristiche peculiari dell'uomo rispetto alle altre specie animali è la straordinaria crescita della corteccia cerebrale, la regione esterna dell'encefalo che conferisce le più spiccate capacità cognitive. Benché i fossili evidenzino una costante espansione di questa struttura nella linea evolutiva che ha dato origine all'uomo dopo la separazione dall'antenato comune con le scimmie antropomorfe, più complesso è ricostruire i passaggi genetici che l'hanno determinata. Tuttavia l'applicazione di innovative tecniche di ingegneria genetica allo sviluppo embrionale sta contribuendo alla comprensione delle tappe evolutive chiave di questa importante transizione anatomico-funzionale. In questo contesto si inseriscono due studi che hanno individuato altrettanti geni che sembrano contribuire in modo fondamentale all'espansione della corteccia cerebrale umana nel corso dell'ontogenesi. Il primo, su «Current Biology», ha mostrato il ruolo del gene regolatore *HARE5* nell'attivazione di un altro gene legato alla proliferazione delle cellule del cervello. L'inserzione di *HARE5* umani in embrioni di topo transgenici ha infatti prodotto una crescita della corteccia cerebrale del 12 per cento superiore a quella di embrioni portanti il gene omologo di scimpanzé, indicando che la variazione nella sua sequenza a promuovere l'espansione cerebrale è specifica della nostra linea evolutiva. Il secondo, su «Science», ha invece identificato un gene strettamente coinvolto nell'espansione della neocorteccia, la componente della corteccia cerebrale di più recente origine evolutiva, durante lo sviluppo embrionale: si chiama *ARHGAP11B* e quando è inserito in topi transgenici promuove un notevole incremento di questa struttura del cervello. Questo gene sarebbe comparso nei primi esponenti del genere *Homo*, in quanto è stato ritrovato anche nei genomi di uomo di Neanderthal e Denisova, mentre non risulta presente negli altri primati. È quindi possibile che entrambi questi geni siano comparsi in epoca molto recente e abbiano contribuito al processo di divergenza tra ominidi bipedi e altri primati.

Andrea Romano



Un limite minimo per la vita



Per la prima volta è stata catturata l'immagine dettagliata al microscopio di un cosiddetto batterio ultrapiù piccolo, appartenente cioè a quei *phyla* di organismi le cui dimensioni sembrerebbero rappresentare il limite minimo raggiungibile da una forma di vita cellulare. L'esistenza dei batteri ultrapiù piccoli è stata dibattuta per decenni, ma anche dopo essere stata assodata i limiti tecnologici non avevano ancora consentito di studiare le caratteristiche fisiche né tantomeno genetiche di questi procarioti. Per avere un'idea delle loro dimensioni, si pensi che 150 di essi occupano lo spazio di un solo *Escherichia coli*, e che 150.000 di queste cellule potrebbe stare sulla punta di un cappello. Le immagini 3D al microscopio elettronico sono state ottenute al Lawrence Berkeley National Laboratory dell'Università della California, grazie a un particolare metodo che ha permesso di raccogliere, selezionare e conservare i batteri ultrapiù piccoli presenti nelle acque sotterranee di un sito nel Colorado. Come riporta «Nature Communications», le analisi genetiche sembrano dimostrare che questi microrganismi, per sopravvivere, debbano unirsi in gruppi e sfruttare necessariamente anche altri batteri presenti nell'ambiente. (MaSe)

Un megaprogetto per la «medicina di precisione»

La Casa Bianca ha proposto di investire più di 200 milioni di dollari in un'iniziativa per studiare la «medicina di precisione». Il progetto annunciato da Barack Obama, che sarà guidato dai National Institutes of Health (NIH), dovrebbe raccogliere i dati medici e il DNA di un milione di volontari, insieme a informazioni sul loro stile di vita e l'ambiente in cui vivono. L'obiettivo è arrivare a cure personalizzate basate sul profilo genetico di ogni individuo, e l'iniziativa si concentrerà da subito sul cancro e su alcune malattie rare.

Il progetto punta a sequenziare il genoma completo di centinaia di migliaia di persone, ma userà anche dati provenienti da decine di progetti più piccoli, per un totale previsto di due milioni di persone coinvolte. Inoltre i volontari avranno accesso ai propri dati, e potranno quindi essere responsabilizzati e partecipare alle decisioni che potrebbero riguardare direttamente la loro salute. I dati saranno generati da diverse fonti, compresi smartphone e altre tecnologie che possono raccogliere informazioni sui parametri fisiologici. I fondi non saranno destinati solo a laboratori universitari: gran parte verrà probabilmente destinata a imprese private che producono le tecnologie per analizzare e stoccare i dati. (AlDe)

L'Italia, terza nel biogas



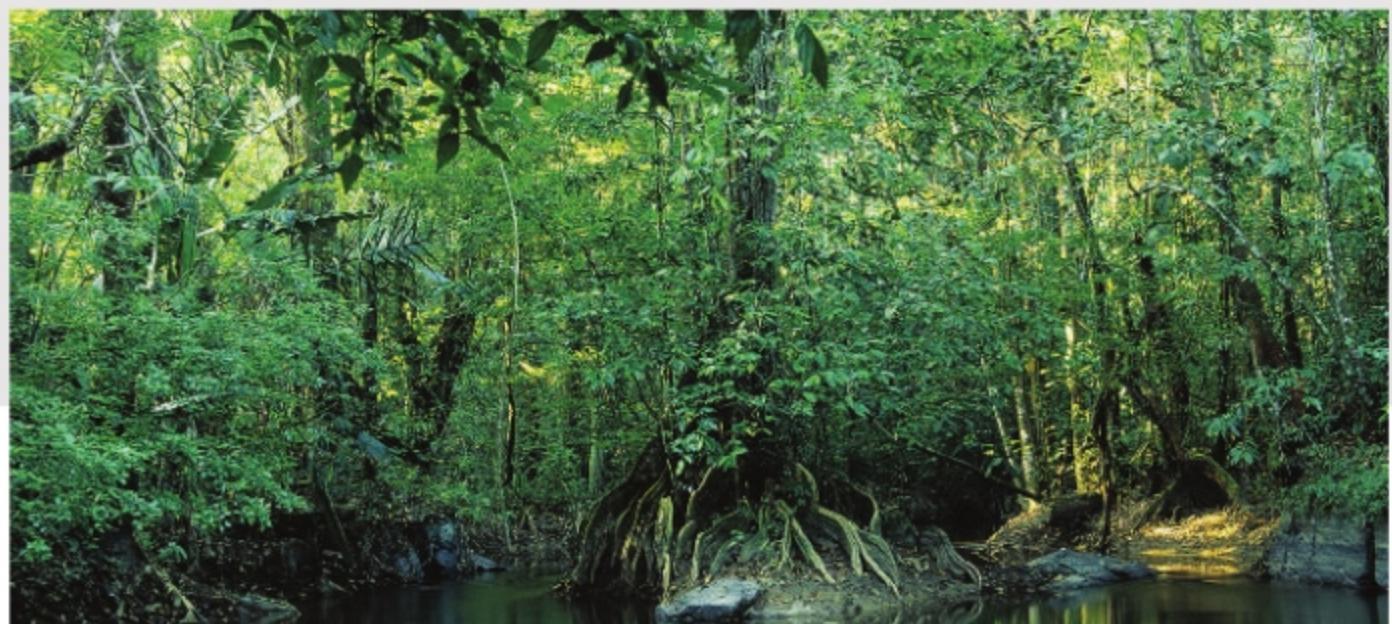
Con circa 1300 impianti installati al 2013, per una potenza di un gigawatt, l'Italia in pochi anni è diventata la terza potenza mondiale, dopo Germania e Cina, nel campo del biogas, il mix di metano e anidride carbonica ottenuto dalla fermentazione anaerobica di rifiuti, letame e prodotti agricoli. Sono dati divulgati dalla società di consulenza energetica Althesys.

La combustione del biogas in centrali fornisce oggi circa 8000 gigawattora di elettricità, costituendo una fonte rinnovabile di grande importanza, in quanto non solo copre già il 2,5 per cento dei consumi nazionali, ma è anche programmabile e può servire a compensare l'intermittenza di solare ed eolico. E quanto resta nei digestori dopo la produzione del gas è un fertilizzante di alta qualità. Da aprile il biogas potrà anche essere trattato per ricavarne biometano puro, da immettere in rete o da usare per alimentare i trasporti: se ne prevedono 600 milioni di metri cubi al 2020. (AlSa)

In aumento la distruzione delle foreste tropicali

Nel 2010 la FAO diede una buona notizia al mondo: nel decennio 2000-2010 la distruzione delle foreste tropicali si era ridotta del 25 per cento rispetto a quella registrata negli anni novanta: sembrava che la mobilitazione per salvare le foreste tropicali avesse avuto successo.

Adesso su «Geophysical Research Letters» è apparsa però una ricerca che spegne gli entusiasmi: la FAO, usando i dati molto parziali forniti dai governi, si era illusa: nel XXI secolo si è continuato ad abbattere alberi come e peggio di prima. Lo studio del geografo Do-Hyung Kim, dell'Università del Maryland, si basa su osservazioni dirette: 5540 foto satellitari scattate fra il 1990 e il 2010 sulle foreste di 34 paesi tropicali, che hanno permesso di evidenziare la deforestazione anche nelle aree meno coperte dai rapporti usati dalla FAO. Per evitare errori umani, Kim ha realizzato un programma che analizza le immagini e stima automaticamente la quantità di foresta intatta. E i risultati sono chiari, se negli anni novanta è stata distrutta una media di 4 milioni di ettari l'anno di foresta, fra il 2000 e il 2010 il tasso di deforestazione è salito a 6,5 milioni (+62 per cento). In questo secolo a essere colpiti sono state soprattutto le foreste amazzonica e dell'Asia meridionale ma, a differenza di quanto registrato negli anni novanta del XX secolo, sono stati rilevati danni notevoli anche in quelle africane. (AlSa)



Evoluzione e gusto



Anche i cambiamenti del gusto hanno contribuito a renderci umani: la nostra storia evolutiva è infatti accompagnata da modifiche nell'alimentazione che hanno influito sulla struttura fisica e le caratteristiche sociali dei nostri antenati.

Ma come ricostruire le tappe di questa trasformazione alimentare? Una risposta arriva dall'analisi di antiche sequenze di DNA, come dimostra una ricerca che ha confrontato la presenza di geni in esseri umani, Neanderthal e denisoviani. Lo studio, pubblicato sul «Journal of Human Evolution», ha mostrato che la perdita di due geni legati alla percezione dell'amaro è avvenuta dopo la separazione del genere *Homosapiens* dagli scimpanzé, ma prima che apparisse le diverse specie umane. Lo stesso destino ha avuto un gene espresso nei muscoli della mandibola: la sua scomparsa rende la masticazione umana più debole di quella di altri primati, e potrebbe essere avvenuta dopo la scoperta della cottura. (VaDa)

Come i vertebrati acquisirono il cranio

Tra le caratteristiche distintive dei vertebrati vi è la presenza della testa, ben supportata e protetta da uno spesso endoscheletro. Dal punto di vista evolutivo, si ritiene che in origine questa struttura interna fosse costituita da cellule cartilaginee, derivate dalla popolazione di cellule embrionali della cresta neurale, come avviene negli agnati, nei pesci cartilaginei e negli embrioni degli odierni vertebrati.

Dato che le cellule cartilaginee derivate dalla cresta neurale non sono mai state trovate nella regione cefalica di un invertebrato, si pensava che fossero un'innovazione evolutiva dei vertebrati. Ma uno studio apparso su «Nature» ha smentito questa ipotesi, mostrando la presenza di queste strutture e degli interruttori molecolari che ne regolano l'attivazione nella regione faringea di larve di anfiosso della Florida, un piccolo cefalocordato. La comparsa dello scheletro della testa dei vertebrati non sarebbe quindi la conseguenza dell'evoluzione ex novo di un diverso tessuto scheletrico, ma deriverebbe dalla cooptazione funzionale di geni esistenti ben prima dell'origine del gruppo, mediante la loro attivazione nella regione cefalica. (AnRo)

Eradicazione globale per la dracunculiasi

Nel 1979 l'Organizzazione mondiale della Sanità annunciò la scomparsa del vaiolo, una delle patologie più letali della storia umana. Ora, nel 2015, siamo prossimi alla seconda eradicazione globale di una malattia su scala globale. Si tratta dell'infestazione da verme di Guinea, o dracunculiasi, una parassitosi poco nota in Occidente ma che fino a pochi anni fa colpiva oltre 50 milioni di persone, prevalentemente tra Asia e Africa, provocando migliaia di decessi.

La dracunculiasi si contrae bevendo acque contaminate da minuscoli crostacei parassitati a loro volta dalle larve del verme di Guinea, che vengono liberate appena il verme fuoriesce dalla pelle degli individui infetti. Qui il parassita forma bolle piene di sostanze tossiche che danno luogo a ulcere, ascessi, e necrosi, che, se non trattate in tempo, possono portare alla morte dell'ospite.

Annunciando il successo della campagna di prevenzione, il Carter Center, la fondazione dell'ex presidente statunitense, ha spiegato che nel 2014 i casi documentati di parassitosi sono stati solo 126, distribuiti tra Sudan meridionale, Ciad, Mali ed Etiopia, e che in poco tempo, senza l'uso di vaccini o farmaci e solo grazie alla diffusione delle corrette pratiche igienico-sanitarie, la malattia potrà essere completamente eradicata dal pianeta. (MaMa)



Il paradosso della «fame chimica»

Uno degli effetti della marijuana è la cosiddetta «fame chimica», un insaziabile appetito che si prova anche a stomaco pieno. Tamas Horvath della Yale University School of Medicine e il suo team hanno ora dimostrato che alla base del fenomeno vi è un funzionamento «paradossale» dei meccanismi normalmente responsabili della soppressione dello stimolo della fame. Il sistema si comporta come una macchina che, azionando i freni, accelera anziché rallentare, spiegano i ricercatori. Il meccanismo,



dicono Horvath e colleghi, inganna il sistema cerebrale che regola i comportamenti legati al nutrimento. Era già noto che la stimolazione del recettore 1 per i cannabinoidi (CB1R) è associata alla fame chimica, ma ora Horvath e colleghi hanno chiarito il ruolo chiave di un tipo di neuroni, le cellule pro-opiomelanocortine (POMC). Il risultato è stato ottenuto stimolando selettivamente le vie cellulari responsabili della risposta ai cannabinoidi, in topi geneticamente modificati. Il risultato è utile anche per mettere a punto migliori terapie di sostegno per i pazienti, come quelli sottoposti a chemioterapia, che perdono l'appetito con vistosi cali ponderali. La ricerca è stata pubblicata su «Nature». (FeSg)



Un giorno si potranno usare
gli ascensori spaziali per trasportare
carichi via dalla Terra. Ma riusciremo
a costruirne di così robusti
da funzionare vicino a un buco nero?

ASTROFISICA

Energia dai buchi neri?

Una civiltà futura potrà estrarre energia dai buchi neri. Ma per farlo i nostri discendenti dovranno prima costruire un ascensore spaziale che sfiderà le leggi della fisica

di Adam Brown

Adam Brown è un fisico teorico della Stanford University. Quando non pensa ai buchi neri, pensa al big bang e alle bolle di vuoto.



Un giorno il Sole si spegnerà. Il combustibile che ne alimenta la fusione nucleare si esaurirà, il cielo diventerà gelido e, se anche la Terra dovesse sopravvivere, l'umanità sprofonderà in un inverno perenne. Per rimanere in vita i nostri discendenti dovranno trovare un'alternativa. Prima daranno fondo alle risorse della Terra, poi del sistema solare e infine a quelle di tutte le stelle di tutte le galassie dell'universo visibile. Quando non rimarrà più nulla da bruciare rivolgeranno lo sguardo all'unico serbatoio di energia rimasto: i buchi neri. Riusciranno a estrarne energia e a salvare la civiltà?

Ho una brutta notizia: questo piano non funzionerà. Il motivo si deve alla fisica di oggetti esotici come le stringhe quantistiche e di una vecchia gloria della fantascienza: l'ascensore spaziale.

False speranze

In prima approssimazione, estrarre energia (o qualunque altra cosa) da un buco nero sembra impossibile. Dopo tutto, i buchi neri sono circondati da un «orizzonte degli eventi», una sfera di non ritorno in cui il campo gravitazionale diventa infinito. Qualunque cosa penetri in questa sfera è condannata: quindi una palla da demolizione che intendesse distruggere un buco nero e liberarne l'energia finirebbe lei demolita e ingoiata dal buco nero insieme al suo sfortunato manovratore. Una bomba scagliata nel buco non solo non lo distruggerebbe, ma anzi lo ingrandirebbe, di una quantità pari alla massa della bomba. Quello che entra in un buco nero non ne esce mai più: né asteroidi, né razzi, e neppure la luce.



O per lo meno è questo che pensavamo. Ma poi, in quello che secondo me è l'articolo di fisica più stupefacente e affascinante mai scritto, nel 1974 Stephen Hawking mostrò che sbagliavamo. Partendo dalle idee di Jacob D. Bekenstein, oggi alla Hebrew University di Gerusalemme, Hawking dimostrò che i buchi neri liberano piccole quantità di radiazioni. Se ci cadiamo dentro, moriamo lo stesso e non ne usciremo mai più, ma la nostra energia prima o poi sì. È una splendida notizia per gli aspiranti minatori di buchi neri: l'energia può sfuggire.

Il motivo per cui ciò accade si deve al crepuscolare mondo della meccanica quantistica. Uno dei fenomeni caratteristici della fisica dei quanti è che essa permette alle particelle di attraversare per «effetto tunnel» ostacoli altrimenti insuperabili. A volte una particella che si muove verso una barriera appare dall'altra parte. Non provateci a casa: se vi lanciate contro una parete, è difficile che vi rimaterializziate indenni al di là del muro. Le particelle microscopiche, invece, sono più inclini agli attraversamenti.

L'effetto tunnel della meccanica quantistica permette a una particella alfa (un nucleo di elio) di sfuggire alla presa di un nucleo radioattivo di uranio, ed è sempre lui a permettere alla «radiazione di Hawking» di uscire da un buco nero. Le particelle sfuggono al campo gravitazionale infinito dell'orizzonte degli eventi, non sfrecciano via, ma attraversandolo per effetto tunnel. (Nessuno ha mai osservato una di queste «perdite» di un buco nero, ovviamente. Ma è una conseguenza così strin-

Quando tra qualche miliardo di anni il Sole morirà, l'umanità dovrà trovare un'altra fonte di energia per sopravvivere. Un possibile candidato sono i buchi neri, che ne sono pieni. **Un esperimento mentale** suggerisce di usare

l'idea fantascientifica degli ascensori spaziali per estrarre la radiazione termica da un buco nero. **Un ascensore spaziale** sarebbe formato da un contenitore che scorre lungo un cavo sospeso vicino all'orizzonte degli eventi del buco nero per

raccogliere la radiazione. La conclusione però è che persino il materiale più resistente dell'universo, la stringa fondamentale, non formerebbe un cavo in grado di resistere all'intensa attrazione gravitazionale vicino all'orizzonte di un buco nero.

gente dell'applicazione della meccanica quantistica allo spazio-tempo curvo che nessuno ne dubita.)

Dato che i buchi neri irradiano, possiamo sperare di sfruttare la loro energia. Ma il diavolo è nei dettagli: quale che sia il modo in cui cerchiamo di estrarre questa energia, incontriamo qualche problema.

Un approccio semplice consiste nel limitarsi ad aspettare. Dopo un tempo sufficiente il buco nero risputa nell'universo la sua energia, un fotone dopo l'altro, portandocela direttamente. Via via che perde energia, il buco nero si restringe, fino a svanire del tutto. Da questo punto di vista un buco nero è come un ottimo caffè di cui non possiamo toccare la superficie per non rimanere smembrati dalla gravità. C'è però ancora un modo di gustare questo caffè apocalittico: aspettare che evapori e inspirarne i vapori.

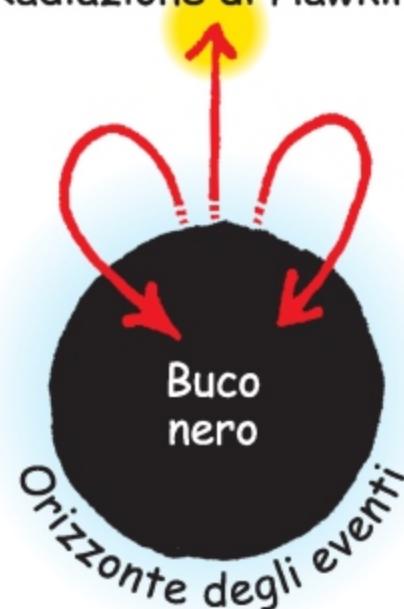
Il problema è che, sebbene aspettare sia semplice, è anche penosamente lento. I buchi neri sono tutt'altro che luminosi: uno con la massa del Sole irradia a 60 nanokelvin; fino agli anni ottanta non sapevamo neppure come realizzare in laboratorio qualcosa di così freddo. Affinché un buco nero di massa pari al Sole evapori, ci vorrebbero 10^{57} volte l'attuale età dell'universo, un tempo incredibilmente lungo. In generale, la durata di vita di un buco nero è data dal cubo della massa, m^3 . I nostri discendenti intirizziti si sentiranno motivati a sveltire le cose.

Un primo motivo di ottimismo per loro conto viene dal fatto che non tutte le particelle di Hawking che escono dall'orizzonte degli eventi sfuggono all'infinito: anzi, praticamente nessuna. Quasi ogni particella che attraversa per effetto tunnel l'orizzonte è poi ricatturata dal campo gravitazionale e torna nel buco nero. Se riuscissimo in qualche modo a sottrarre questi fotoni alla presa del buco nero, portandoli in salvo dopo che sono sfuggiti all'orizzonte ma prima che siano ricatturati, potremmo forse raccogliere più velocemente l'energia dei buchi neri.

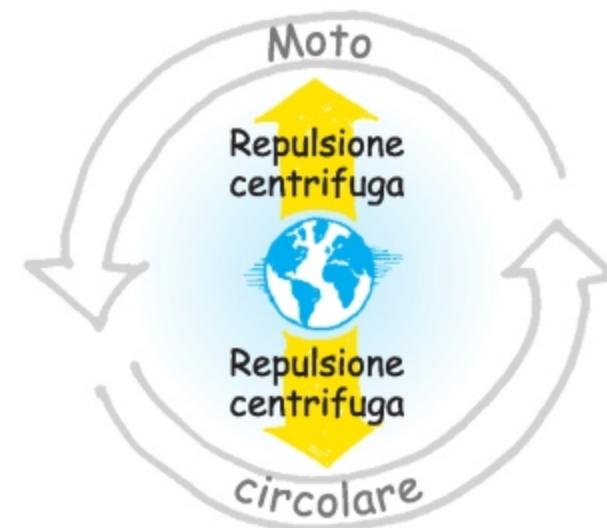
Per capire come liberare questi fotoni dobbiamo prima studiare le forze estreme che si manifestano vicino a un buco nero. Il motivo per cui la maggior parte delle particelle viene ricatturata è che non sono emesse perpendicolarmente verso l'esterno. Immaginiamo di generare un fascio laser appena fuori dall'orizzonte. Affinché la luce possa sfuggire dobbiamo puntarlo esattamente verso l'alto; più siamo vicini all'orizzonte, più dobbiamo puntarlo con

precisione. Il campo gravitazionale è così intenso che se ci allontaniamo anche di poco dalla verticale la luce girerà in tondo e ricadrà dentro.

Radiazione di Hawking



Può sembrare strano che sia la rotazione a impedire alla particella di sfuggire: dopo tutto è proprio la velocità orbitale a mantenere sospesa la Stazione spaziale internazionale, fornendole la spinta centrifuga che contrasta la gravità.



Se però ci avviciniamo troppo a un buco nero, la situazione si inverte: la velocità angolare impedisce la fuga. Questo effetto è conseguenza della relatività generale, che afferma che sia la massa sia l'energia sono soggette alla gravità: non solo la massa a riposo di un oggetto, ma anche l'energia cinetica del suo moto orbitale. Vicino a un buco nero (o, più precisamente, entro una volta e mezza il raggio dell'orizzonte degli eventi), l'attrazione gravitazionale dell'energia cinetica orbitale è più intensa della repulsione centrifuga. All'interno di questo raggio, una velocità angolare maggiore fa precipitare più velocemente le particelle.

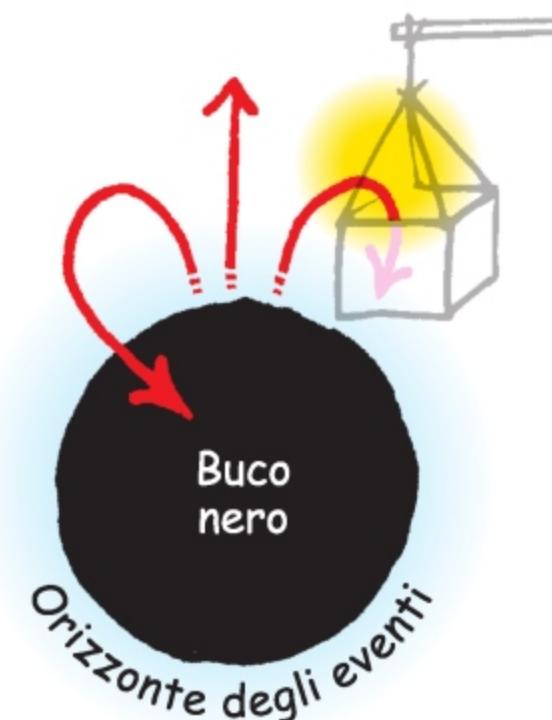
Il risultato è che, se ci si cala lentamente verso un buco nero, si raggiunge pre-



sto una temperatura altissima. Si viene immersi non solo nei fotoni che sarebbero sfuggiti all'infinito sotto forma di radiazione di Hawking, ma anche in quelli che non ce l'avrebbero fatta. Il buco nero ha un'«atmosfera termica»: più ci si avvicina all'orizzonte degli eventi e più fa caldo. Questo calore è portatore di energia.

Il fatto che l'energia sia immagazzinata al di fuori dell'orizzonte degli eventi ha portato all'ingegnosa proposta di sfruttare un buco nero come «miniera»: ci si avvicina, se ne preleva l'atmosfera termica e la si porta via. Basta sospendere un contenitore vicino all'orizzonte degli eventi (ma senza raggiungerlo), riempirlo di gas incandescenti e trainarlo via. Una parte del contenuto si sarebbe allontanata in ogni caso, in forma di radiazione di Hawking convenzionale, ma la maggior parte del gas, se non fossimo intervenuti, sarebbe stata destinata a ricadere dentro. (Una volta che il gas non è più nelle immediate vicinanze dell'orizzonte degli eventi, trasportarlo per il resto della distanza che lo separa dalla Terra è relativamente facile: lo si carica su un razzo oppure lo si converte in un laser puntato verso di noi.)

Questa strategia è analoga a soffiare sul nostro caffè delizioso ma pericoloso. Di per



Più ci si avvicina all'orizzonte degli eventi e più fa caldo. Questo calore è portatore di energia

sé, buona parte del vapor acqueo emesso ricadrebbe dentro, ma soffiando sulla superficie il vapore appena emesso è allontanato prima che possa essere ricatturato. Si ipotizzava che asportando l'atmosfera termica di un buco nero lo si potesse divorare rapidamente, in una quantità di tempo che non va come m^3 , ma come il ben più veloce m .



In un articolo recente ho però dimostrato che questa congettura è falsa. Il problema non deriva da profondi ragionamenti di meccanica quantistica o di gravità quantistica, ma da una considerazione banalissima: non è possibile trovare una corda sufficientemente resistente. Per prelevare l'atmosfera termica dobbiamo sospendere un cavo vicino a un buco nero, cioè creare un ascensore spaziale. Ma quello di cui mi sono accorto è che costruire un ascensore spaziale vicino a un buco nero è impossibile.

Ascensore per il cielo

Un ascensore spaziale (in inglese *space elevator* o *sky hook*) è una struttura futuristica resa famosa dallo scrittore di fantascienza Arthur C. Clarke nel suo romanzo del 1979 *Le fontane del Paradiso*. Immaginò un cavo sospeso dallo spazio verso la superficie della Terra. Non è sorretto da una spinta dal basso (come accade per un grattacielo, in cui ogni piano sostiene i piani sovrastanti), ma da una trazione dall'alto (ogni tratto di cavo regge quelli sottostanti). L'estremità in alto è ancorata a una massa enorme, in orbita lenta molto al di sopra della quota geostazionaria, che tira verso l'esterno il cavo, mantenendolo sospeso. L'estremità in basso finisce a poca distanza dalla superficie terrestre: l'equilibrio delle forze fa sì che rimanga fluttuan-

te, come per magia (magia che, osservò una volta Clarke, è indistinguibile da una tecnologia sufficientemente avanzata).

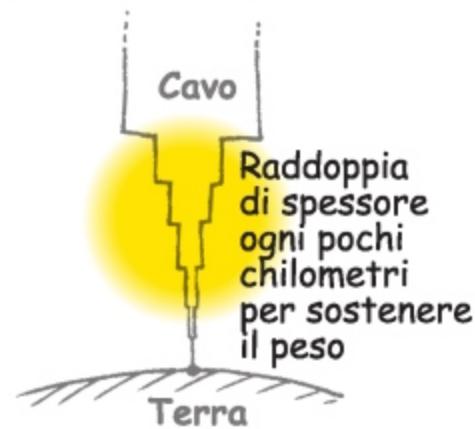
Il senso di questa tecnologia avanzata è che, una volta che il cavo si trova in posizione, portare carichi in orbita diventa molto più facile. Non dobbiamo più ricorrere ai razzi, pericolosi, inefficienti e dispendiosi, che per la prima parte di ogni viaggio sollevano quasi solo il proprio carburante. Basta far salire lungo il cavo un ascensore alimentato elettricamente. Se il costo marginale di sollevare il carico fino all'orbita terrestre bassa è ridotto al prezzo dell'elettricità, portare un chilogrammo nello spazio scende dalle decine di migliaia di dollari richieste dallo space shuttle a un paio di dollari: andare nello spazio costa meno di un biglietto della metropolitana.

Gli ostacoli tecnologici per la costruzione di un ascensore spaziale sono immensi: il principale consiste nel trovare un materiale adatto per il cavo. Il materiale ideale dovrebbe essere resistente e leggero: tanto resistente da non deformarsi o spezzarsi sotto lo sforzo e tanto leggero da non gravare eccessivamente sul tratto sovrastante.

L'acciaio non è robusto abbastanza, neppure lontanamente. Oltre al peso di



tutto quello che c'è sotto, ogni segmento di acciaio deve anche sostenere il proprio peso, e quindi il cavo deve essere sempre più spesso via via che si va in alto. Dato l'elevato peso dell'acciaio in relazione alla sua resistenza, vicino alla Terra il cavo dovrebbe raddoppiare di spessore ogni pochi chilometri. Molto prima di raggiungere la quota geostazionaria sarebbe tanto spesso da essere inutilizzabile.



Costruire un ascensore orbitale sulla Terra con i materiali dell'Ottocento non può funzionare, ma i materiali del XXI secolo sono già più promettenti. I nanotubi di carbonio, lunghi nastri di carbonio disposti in un reticolo esagonale, sono 1000 volte più resistenti dell'acciaio. I nanotubi di carbonio sono ottimi candidati per un ascensore spaziale extraterrestre.

Costerebbe molti miliardi di dollari, e sarebbe di gran lunga il più grande mega-progetto mai intrapreso; richiederebbe di capire come creare nanotubi in filamenti lunghi decine di migliaia di chilometri e di affrontare molti altri ostacoli. Ma per un fisico teorico come me, una volta stabilito che una possibile struttura non viola nessuna delle leggi note della fisica, tutto il resto è solo ingegneria. (Da questo punto di vista, anche il problema di costruire una centrale elettrica a fusione è «risolto», sebbene ci sia un'evidente assenza di centrali a fusione che alimentino la nostra civiltà, con la rilevante eccezione del Sole).

Un ascensore sul buco nero

Attorno a un buco nero, ovviamente, il problema è molto più arduo. Il campo gravitazionale è più intenso, e quello che funziona sulla Terra è penosamente inadeguato al bisogno.

Si può dimostrare che persino con i tanto decantati nanotubi di carbonio un ipotetico ascensore spaziale che arrivasse vicino all'orizzonte degli eventi dovrebbe o essere così sottile vicino al buco nero che un solo fotone di Hawking lo spezzerebbe, o sarebbe così spesso all'estremità alta che il cavo collasserebbe sotto la propria gravità e di-

venterebbe a sua volta un buco nero.

Queste limitazioni escludono l'uso dei nanotubi di carbonio. Ma come all'Età del bronzo seguì l'Età del ferro, e come all'acciaio seguiranno un giorno i nanotubi di carbonio, possiamo aspettarci che gli scienziati dei materiali inventino materiali sempre più robusti e sempre più leggeri. Ed è probabile che ci riescano; tuttavia il progresso non può andare avanti indefinitamente. C'è un limite al progresso, all'ingegneria, al rapporto tra resistenza alla trazione e peso di un materiale, un limite che è imposto dalle leggi stesse della natura. Questo limite è una conseguenza sorprendente della famosa formula einsteiniana $E = mc^2$.

La tensione di un cavo ci dice quanta altra energia è necessaria per allungarlo: più una corda è tesa, più energia serve per aumentarne la lunghezza. In un elastico è presente la tensione perché per allungarlo dobbiamo spendere energia per ridisporre le molecole: quando le molecole sono facili da ridisporre (cioè energeticamente economiche), la tensione è bassa; quando è dispendioso riarrangiarle, la tensione è elevata. Ma anziché risistemare parti del cavo esistente potremmo produrre un nuovo tratto di cavo e aggiungerlo a un'estremità. In questo modo il costo in energia dell'estensione del cavo è pari all'energia contenuta nella massa del nuovo tratto di cavo, ed è data dalla formula $E = mc^2$: la massa (m) del nuovo segmento per la velocità della luce al quadrato (c^2).

È un modo molto dispendioso in termini di energia per allungare una corda, ma è anche un modo infallibile; fornisce un limite superiore al costo energetico dell'allungamento di una corda e così anche un limite alla tensione di una corda, che non potrà mai essere maggiore della massa moltiplicata per c^2 per unità di lunghezza. (Si potrebbe pensare che due cavi intrecciati insieme abbiano una resistenza doppia rispetto a un cavo singolo; avrebbero però anche un peso doppio, e quindi non cambierebbe il rapporto tra resistenza e peso.)

Questo limite assoluto alla re-



PER APPROFONDIRE

Le fontane del Paradiso. Clarke A., Collana Urania, Mondadori, Milano, 1979.

Acceleration Radiation and the Generalized Second Law of Thermodynamics. Unruh W.G. e Wald R.M., in «Physical Review D», Vol. 25, n. 4, pp. 942-958, 15 febbraio 1982.

La meccanica quantistica dei buchi neri. Hawking S.W., in «Le Scienze», n. 105, maggio 1977.

Catturando qualche fotone

**non raggiungeremmo il livello di estrazione
con cui alimentare una civiltà affamata**

sistenza dei materiali lascia ancora molto spazio al progresso tecnologico: è centinaia di miliardi di volte maggiore di quella dell'acciaio e, facendo le debite proporzioni, ancora centinaia di milioni di volte maggiore dei nanotubi di carbonio. Il senso è però che non possiamo migliorare indefinitamente i nostri materiali. Come i nostri sforzi di viaggiare sempre più veloci si devono fermare alla velocità della luce, allo stesso modo quelli di costruire materiali più robusti devono fermarsi a $E = mc^2$.

Esiste per il cavo un materiale ipotetico che raggiunge esattamente il limite, che ha cioè esattamente la maggior resistenza possibile. Questo materiale non si è mai visto in laboratorio, e alcuni fisici dubitano persino della sua esistenza, mentre altri hanno dedicato la vita a studiarlo. La corda più robusta dell'universo non è mai stata osservata, ma ha già un nome: stringa. Quelli che studiano le stringhe, i teorici delle stringhe, sperano che si tratti dei componenti ultimi della materia; ai nostri fini non è importante il loro ruolo fondamentale, ma solo la loro robustezza.

Le stringhe sono forti. Un tratto di cavo fatto di stringhe, lungo e pesante come un laccio per scarpe, potrebbe tenere sospeso il monte Everest. Dato che quando un'impresa tecnica si fa dura i materiali duri cominciano a giocare, se vogliamo costruire un ascensore spaziale accanto a un buco nero la nostra speranza migliore sono le stringhe; là dove i nanotubi falliscono, forse le stringhe fondamentali possono avere successo. Se c'è qualcosa che può andare bene, sono le stringhe; se viceversa neppure le stringhe vanno bene, i buchi neri sono al sicuro.

Il risultato è che, sebbene le stringhe siano resistenti, non lo sono poi tanto: sono al limite. Se fossero più resistenti sarebbe facile realizzare un

ascensore spaziale attorno a un buco nero; se lo fossero di meno, non ci sarebbero speranze, e si spezzerebbero sotto il loro stesso peso. Sono al limite nel senso che, mentre un cavo fatto di stringhe sospeso verso la superficie di un buco nero ha una resistenza sufficiente per sostenere il proprio peso, non gliene resta per sostenere il carico dell'ascensore. Il cavo si sostiene ma a costo di rinunciare alla cabina.

È questo, quindi, che protegge i buchi neri dalle intromissioni. Le leggi stesse della natura limitano i materiali che possiamo usare, il che significa che, malgrado una corda possa raggiungere la densa atmosfera termica di un buco nero, non può furtivamente saccheggiarla. Dato che la resistenza di una stringa è al limite, potremmo estrarre una quantità limitata di energia dallo strato superiore dell'atmosfera, il più rarefatto, con un cavo più corto.

Ma questa dieta magra non sarebbe molto meglio che limitarsi ad aspettare: la vita del buco nero continua a essere dell'ordine di m^3 , come nel caso dell'evaporazione lasciata a sé stessa. Catturando qualche fotone qua e là potremmo abbreviare di un piccolo coefficiente la vita di un buco nero, ma non raggiungeremmo il livello industriale di estrazione necessario per alimentare una civiltà affamata.

Anche qui la velocità finita della luce è nostra nemica. Dato che non possiamo andare più veloci, non possiamo sfuggire all'orizzonte degli eventi di un buco nero. Dato che non possiamo estrarre un'energia maggiore di mc^2 dai nostri combustibili, siamo destinati a rivolgerci speranzosi ai buchi neri. E dato che una corda non potrà mai essere più robusta del quadrato della velocità della luce moltiplicato per la sua massa unitaria, non potremo mai nutrirci del contenuto del buco nero.

Quando il Sole si spegnerà, dunque, vivremo in un inverno perpetuo. Potremo puntare lo sguardo all'enorme riserva di energia dell'atmosfera termica di un buco nero, ma proveremo ad attingerne a nostro rischio e pericolo. Se saremo troppo avidi o andremo troppo a fondo, anziché avere un contenitore che porta via qualcosa dal buco nero, sarà il buco nero a portar via il contenitore. Sarà un gelido inverno. ■

Menti di Neanderthal

Analisi di anatomia, DNA e resti materiali culturali hanno portato novità stimolanti sulla vita interiore dei nostri misteriosi cugini estinti

di *Kate Wong*

A Gibilterra, se la giornata è limpida, da dentro la grotta di Gorham si può vedere l'aspra costa del Marocco settentrionale che incombe bluastro sul mare turchese. Dentro la grotta prevale il silenzio, salvo il rumore delle onde che lambiscono la spiaggia di sassi. Ma il mare, lo stretto che separa la punta più meridionale della penisola iberica dal continente africano, ferve di attività. Pescherecci in cerca di marlin e tonni, navi da crociera con i turisti a bocca aperta di fronte all'incombente massiccio calcareo di Gibilterra, petroliere che vanno dal Mediterraneo verso ovest. Grazie alle veloci correnti ricche di nutrienti, al clima mite e alla sua posizione chiave, da millenni questa zona attrae gli esseri umani.

IN BREVE

L'opinione da tempo consolidata sui Neanderthal, i nostri parenti più vicini, è che fossero assai più arretrati di *Homo sapiens* riguardo alle abilità cognitive.

Gli studi mostrano che i Neanderthal erano diversi da *H. sapiens* nell'anatomia cerebrale e nel DNA, ma il significato funzionale di queste differenze è poco chiaro.

I resti della cultura neanderthaliana danno indicazioni più chiare sulla mente dei Neanderthal e riducono di molto il presunto divario mentale tra noi e loro.

I risultati fanno pensare che a condurre i Neanderthal all'estinzione e far prosperare *H. sapiens* siano stati altri fattori, non legati all'intelligenza.



Degno di nota è un gruppo vissuto nella regione per decine di migliaia di anni, superando diverse ere glaciali. In quei periodi, l'abbassamento del livello del mare esponeva davanti alla grotta una vasta pianura costiera, dove prosperava una gran varietà di animali e piante. Questi individui sfruttavano abilmente le risorse locali. Cacciavano grossi animali come stambecchi e foche, e prede più piccole, come conigli e piccioni; pescavano orate e raccolgivano cozze e patelle sulla costa distante; raccoglievano pinoli dai sempreverdi circostanti. A volte, catturavano corvi e aquile per adornarsi delle loro magnifiche penne nere. E sul pavimento della caverna incidevano simboli il cui significato si è ormai perso nel tempo.

Sotto tutti questi aspetti si comportavano proprio come i nostri antenati *Homo sapiens*, che emersero in Africa con la stessa anatomia che abbiamo noi oggi e poi colonizzarono ogni angolo del pianeta. Ma non erano esseri umani anatomicamente moderni: erano uomini di Neanderthal, i nostri cugini, quelli tozzi, con le sopracciglia sporgenti, di cui sappiamo che sono vissuti in Eurasia tra i 350.000 e i 39.000 anni fa, gli stessi Neanderthal il cui nome nella cultura popolare è diventato sinonimo del più stupido e bruto stato di natura.

Le radici scientifiche di questa diffusa visione dispregiativa affondano nel passato. Già la scoperta del primo scheletro largamente completo di un Neanderthal, all'inizio del Novecento, nel sito francese di La Chapelle-aux-Saints, diede origine a un problema di immagine del gruppo: certe deformità che oggi sappiamo dovute all'età avanzata di quell'individuo furono prese per segni di degenerazione e carattere subumano.

Il pendolo delle opinioni dei paleoantropologi ha poi ripetutamente oscillato tra chi vede i Neanderthal come inferiori per capacità cognitive rispetto a *Homo sapiens* e chi li ritiene invece equivalenti a noi dal punto di vista mentale. Oggi una raffica di nuove scoperte torna a ravvivare il dibattito. Fossili e analisi di antichi DNA sembrano suggerire che il cervello dei Neanderthal era effettivamente diverso e meno dotato di quello di *H. sapiens*. Ma prove archeologiche sempre più numerose indicano che gli uomini di Neanderthal si comportavano per molti aspetti proprio come i loro contemporanei anatomicamente moderni.

Più gli scienziati studiano la mente dei Neanderthal, più si fa profondo il mistero del motivo per cui i nostri parenti più prossimi si siano estinti, dopo un regno durato centinaia di migliaia di anni. La gara per rispondere all'interrogativo è aperta: le risposte contribuiranno a svelare che cosa ci abbia distinto dal resto della famiglia umana e abbia consentito agli esseri umani anatomicamente moderni di affermarsi come la specie di enorme successo che siamo oggi.

Indizi scheletrici

Da tempo i paleoantropologi cercano indizi sulle capacità cognitive dei Neanderthal nei crani fossilizzati che si sono lasciati alle spalle. Studiando calchi dell'interno della scatola cranica, i ricercatori possono ricostruire la forma esterna del cervello degli esseri umani estinti, che rivela la grandezza totale e quella di alcune regioni cerebrali. Ma queste analisi non hanno trovato nette differenze tra il cervello dei Neanderthal e quello di *H. sapiens*. (Alcuni esperti ritengono che i Neanderthal fossero solo una delle

tante popolazioni di *H. sapiens*. Qui i due gruppi sono invece trattati come due specie umane diverse, sebbene strettamente imparentate.) Il cervello dei Neanderthal era un po' più piatto del nostro, ma altrettanto grande. Anzi, in molti casi anche più grande, spiega Ralph Holloway della Columbia University, paleoneurologo. I loro lobi frontali – che fra l'altro governano la capacità di trovare soluzioni a problemi – erano quasi identici a quelli di *H. sapiens*, a giudicare dalle impronte lasciate sulla superficie interna della scatola cranica. Quelle impronte però non rivelano le strutture interne di queste regioni cerebrali chiave. «I calchi endocranici forniscono le prove più dirette sull'evoluzione del cervello, ma sono assai limitati nel dare informazioni solide sul comportamento», ammette Holloway.

In uno studio assai pubblicizzato del 2013, Eiluned Pearce dell'Università di Oxford e colleghi hanno dichiarato di aver aggirato alcuni limiti dei calchi endocranici, proponendo una via per stimare le dimensioni delle aree interne del cervello. Il suo gruppo ha usato le dimensioni delle orbite oculari come indicatore indiretto di quelle della corteccia visiva, la regione cerebrale che elabora i segnali visivi. Nei crani che hanno misurato, i Neanderthal avevano orbite oculari significativamente più grandi rispetto a quelle degli esseri umani moderni – migliori per affrontare i livelli più bassi di luminosità delle latitudini elevate a cui vivevano, secondo una teoria – e quindi corteccce visive più grandi. Gli scienziati hanno anche affermato che avendo più spazio dedicato all'elaborazione delle informazioni visive, i Neanderthal avrebbero avuto meno tessuto nervoso per le altre regioni del cervello, comprese quelle che ci aiutano a mantenere estese reti sociali che ci sostengono nei tempi difficili.

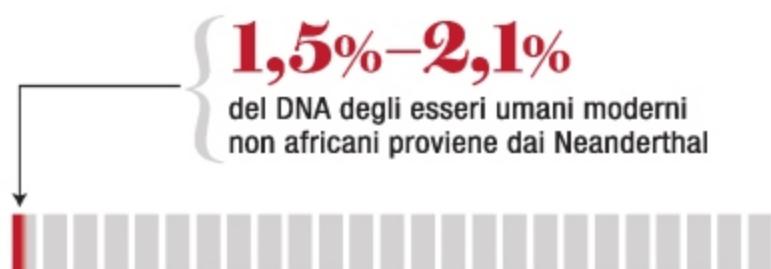
Holloway non è convinto. Il suo lavoro sui calchi indica che non c'è modo di delineare e misurare la corteccia visiva. I Neanderthal avevano la faccia più larga degli uomini anatomicamente moderni, il che potrebbe spiegare le maggiori dimensioni delle orbite. In più, osserva, oggi la variabilità tra una persona e l'altra nei rapporti quantitativi tra corteccia visiva e altre regioni cerebrali è elevata e non sembra corrispondere a differenze comportamentali.

Anche altre analisi sui fossili hanno dato indicazioni ambigue sulla mente dei Neanderthal. Studi sull'asimmetria degli arti, i segni di usura degli attrezzi e dei denti (per averli usati per tenere fermi oggetti come pelli animali da lavorare) indicano che i Neanderthal erano destrimani quanto lo siamo noi oggi. La forte tendenza a preferire la mano destra è uno dei tratti che distinguono *H. sapiens* dagli scimpanzé e corrisponde ad asimmetrie cerebrali ritenute legate al linguaggio, un aspetto chiave del comportamento umano moderno. Però gli studi sulla forma del cranio in esemplari di Neanderthal rappresentativi di vari stadi di sviluppo indicano che il loro cervello raggiungeva grandi dimensioni seguendo un percorso diverso da quello di *H. sapiens*. Inizialmente, nell'utero, il cervello dei Neanderthal cresceva come quello moderno, ma dopo la nascita seguiva un cammino divergente, proprio in un periodo critico per lo sviluppo cognitivo.

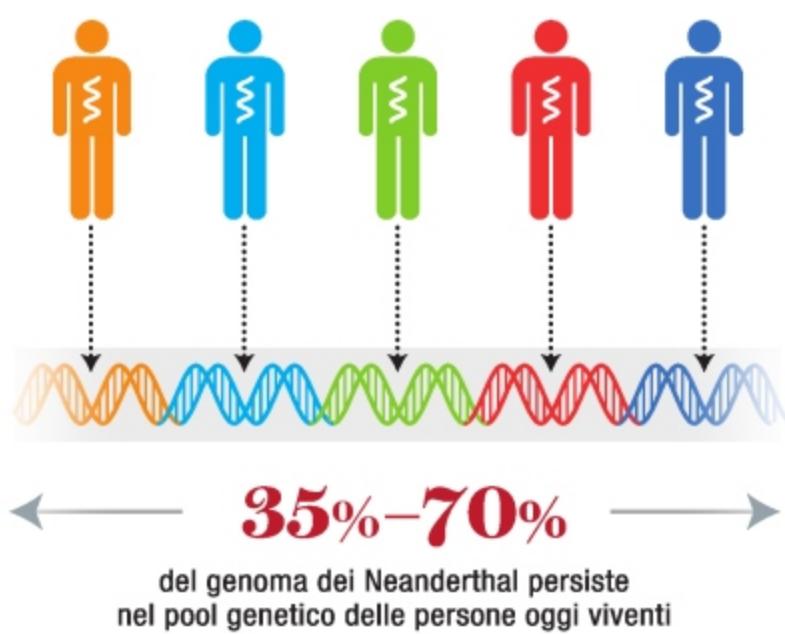
Queste differenze di sviluppo potrebbero avere profonde radici evolutive. Un'analisi di circa 17 crani datati 430.000 anni fa e provenienti dal sito di Sima de los Huesos, nella Sierra de Atapuerca, in Spagna settentrionale, ha mostrato che i membri della popolazione che viveva lì, ritenuti precursori dei Neanderthal,

L'eredità dei Neanderthal

Le analisi del DNA recuperato da parecchi fossili ha rivelato che i Neanderthal si sono incrociati con *H. sapiens* dopo l'uscita della nostra specie dall'Africa. Il DNA dei Neanderthal sopravvive oggi in molte persone come risultato di questi incroci remoti.



Ogni individuo ha solo una piccola quantità di DNA neanderthaliano. Ma non tutti sono portatori degli stessi tratti. Infatti, rimettendo insieme i tratti di DNA neanderthaliano ricavati da un ampio campione di esseri umani moderni, si potrebbe ricostruire tra il 35 e il 70 per cento del genoma dei Neanderthal.



avevano un cervello più piccolo dei successivi membri di questa linea di discendenza. Ciò suggerisce che le grosse dimensioni del cervello dei Neanderthal non fossero un'eredità dell'ultimo antenato comune fra Neanderthal ed esseri umani moderni; l'espansione del cervello sarebbe invece avvenuta in parallelo ma separatamente nelle due specie, in qualche fase successiva della loro evoluzione. Anche se il cervello dei Neanderthal alla fine è diventato grande circa quanto il nostro, la sua evoluzione indipendente avrebbe permesso l'emergere di altre differenze cerebrali, come quelle che influiscono sulla connettività.

Indicazioni genetiche

Qualche barlume di alcune di queste differenze si coglie dalle analisi del DNA. Da quando è stata pubblicata una bozza del genoma dei Neanderthal nel 2010, i genetisti hanno analizzato a fondo il DNA antico per confrontare le due specie. Interessante è il fatto che i Neanderthal siano risultati portatori di una variante molto simile alla nostra di un gene chiamato *FOXP2*, che si ritiene abbia un ruolo nelle facoltà di parola e linguaggio degli esseri umani. In altre parti, però, il genoma dei Neanderthal

sembra diverso dal nostro per aspetti significativi. Per dirne uno, i Neanderthal sembrano aver avuto versioni diverse di altri geni coinvolti nel linguaggio, fra cui *CNTNAP2*. In più, diversi degli 87 geni degli esseri umani moderni che differiscono in modo significativo dalle loro controparti nei Neanderthal e in un altro gruppo ominino arcaico, l'uomo di Denisova, sono coinvolti nello sviluppo e nelle funzioni del cervello.

Tuttavia, le differenze nelle sequenze genetiche tra Neanderthal ed esseri umani moderni non raccontano tutta la storia. Anche l'attivazione e la disattivazione di geni potrebbe aver distinto i due gruppi, in modo che esseri umani moderni e Neanderthal fossero diversi nella costanza e nelle circostanze di produzione delle sostanze codificate dai loro geni. In effetti, proprio *FOXP2* sembra sia stato espresso diversamente nei Neanderthal e in *H. sapiens*, sebbene la proteina prodotta fosse la stessa. Gli scienziati hanno iniziato a studiare la regolazione genica nei Neanderthal e in altri gruppi umani estinti esaminando la disposizione nei genomi antichi di etichette chimiche chiamate gruppi metilici. Queste etichette sono note per influire sull'attività dei geni.

La grande questione, però, è se le differenze nelle sequenze e nell'attività dei geni si traducessero o meno in differenze nell'attività cognitiva. A questo proposito sono emersi interessanti indizi dallo studio di persone che oggi sono portatrici di una piccola percentuale di DNA neanderthaliano come risultato di incroci tra Neanderthal e *H. sapiens* avvenuti in tempi remoti.

John Blangero, genetista del Texas Biomedical Research Institute, conduce uno studio a lungo termine su famiglie estese di San Antonio mirato a individuare i geni coinvolti in malattie complesse come il diabete. Negli ultimi anni, con i suoi colleghi, ha iniziato osservare struttura e funzioni cerebrali dei partecipanti allo studio. Blangero, che per formazione è un antropologo fisico, ha cominciato a chiedersi come avrebbe potuto usare gli esseri umani di oggi per rispondere alle domande sulle possibili abilità cognitive dei Neanderthal.

Con il passare del tempo ha iniziato a prendere forma un piano. Nel corso della loro ricerca sulla malattia, Blangero e il suo gruppo avevano ottenuto la sequenza dell'intero genoma e le scansioni in risonanza magnetica (fMRI) del cervello di centinaia di pazienti, inoltre avevano sviluppato un metodo statistico per valutare gli effetti di certe varianti genetiche legate alla malattia su tratti osservabili. Blangero ha capito che grazie a questo strumento statistico potevano usare i genomi dei Neanderthal insieme con i dati genetici e di MRI dei soggetti ottenuti dal suo gruppo per stimare l'effetto dell'insieme delle varianti genetiche neanderthaliane su tratti legati alla cognizione.

I risultati di Blangero e colleghi suggeriscono che diverse regioni cerebrali chiave erano più piccole nei Neanderthal rispetto agli esseri umani moderni, tra cui: l'area superficiale della materia grigia (che contribuisce all'elaborazione dell'informazione nel cervello), l'area di Broca (che sembra coinvolta nel linguaggio) e l'amigdala (che controlla emozione e motivazione). Inoltre, i risultati indicano che i Neanderthal dovevano avere meno materia bianca, il che si traduce in una minore connettività cerebrale. Altri tratti ancora ne avrebbero compromesso la capacità di apprendere e ricordare le parole. «Quasi certamente i Neanderthal erano meno abili dal punto di vista cognitivo», afferma Blangero, che ha presentato i suoi risultati preliminari nell'aprile 2014 a Calgary, alla riunione annuale dell'American Association of Physical Anthropologists. «Sono pronto a scommetterci».

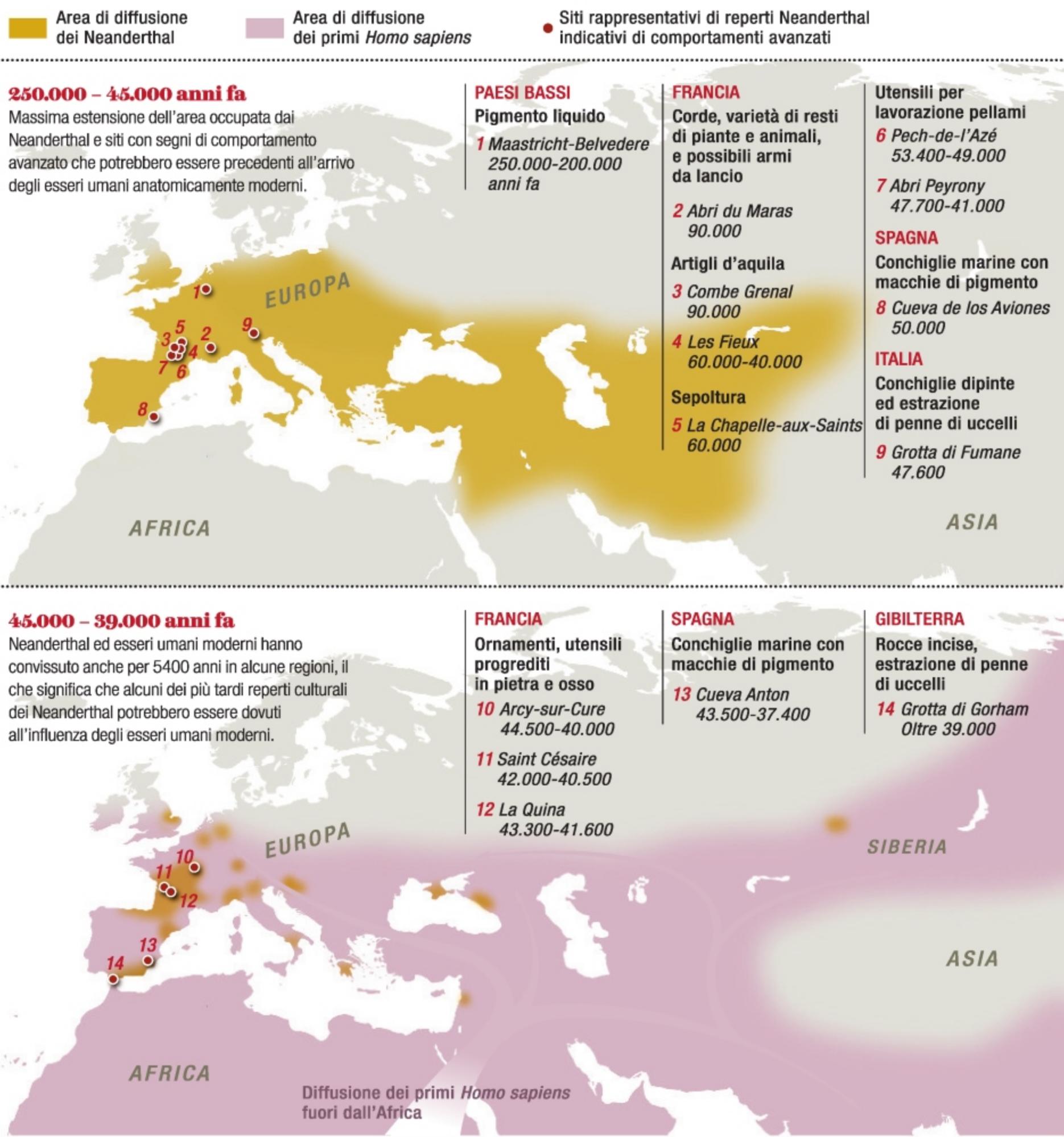
Ovviamente, visto che in giro di Neanderthal vivi oggi non ce

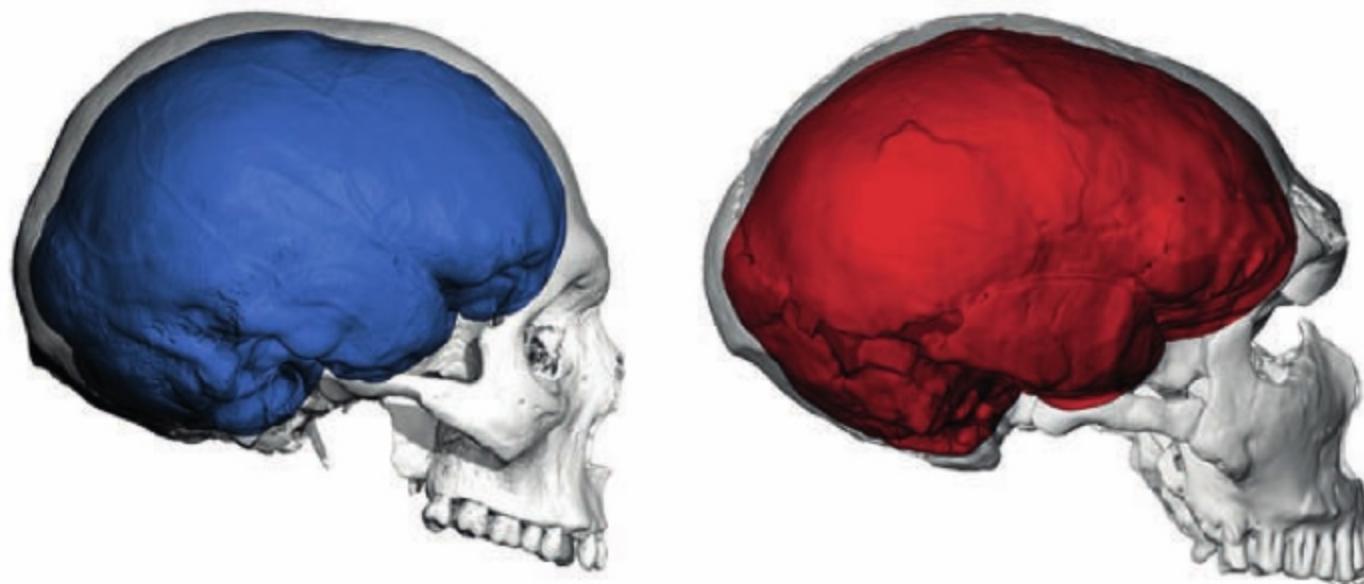
Effetto *Homo sapiens*

I Neanderthal dominarono l'Eurasia per centinaia di migliaia di anni, fino a quando *Homo sapiens* anatomicamente moderno proveniente dall'Africa non invase il loro territorio; a quel punto i Neanderthal scomparvero. Alcuni addetti ai lavori avevano proposto che i Neanderthal fossero stati sconfitti da *H. sapiens* perché non avevano abilità linguistiche e sociali, ingegnosità tecnologica e tecniche progredite di ricerca del cibo che invece avevano i nuovi arrivati. Ogni indizio di raffinatezza culturale scoperto nei siti Neanderthaliani di datazione più recente era stato attribuito all'influenza di *H. sapiens*.

Negli ultimi tempi, sforzi mirati a datare con precisione l'estinzione dei

Neanderthal, datando di nuovo numerosi siti europei, hanno indicato che in certe zone la sovrapposizione tra Neanderthal e *H. sapiens* è durata migliaia di anni, un tempo ampiamente sufficiente affinché i Neanderthal apprendessero le arti dei nuovi arrivati. Tuttavia, negli ultimi anni una serie di scoperte ha dimostrato la raffinatezza culturale dei Neanderthal, da oggetti simbolici a una larga varietà di resti di cibo, in siti che precedono l'arrivo di *H. sapiens*. La domanda che oggi si pongono gli scienziati è se i nuovi arrivati fossero solo più bravi a fare le stesse cose o se dietro la fine dei Neanderthal ci sia stato qualche altro fattore.





La forma del cervello
è diversa nei Neanderthal (a destra) e in *Homo sapiens* (a sinistra), ma ancora non sappiamo come questa differenza potrebbe aver influito sul pensiero.

ne sono, Blangero non può valutarne le capacità cognitive per confermare o confutare le sue conclusioni. In teoria però c'è un altro modo per testare le sue idee. Con le tecnologie di cui disponiamo si potrebbe studiare il funzionamento delle cellule cerebrali dei Neanderthal, modificando geneticamente cellule cerebrali umane in modo che contengano sequenze di DNA neanderthaliano, poi programmandole per diventare neuroni e infine osservando queste cellule «neanderthalizzate» in piastre di Petri. Gli scienziati potrebbero allora verificare, per esempio, la capacità di questi neuroni di condurre gli impulsi elettrici, migrare verso le diverse regioni cerebrali e produrre le proiezioni (i neuriti) che aiutano la comunicazione intercellulare. Blangero nota che sebbene ci siano questioni etiche da considerare per quanto riguarda la creazione di cellule di Neanderthal, questo tipo di ricerche potrebbe contribuire a identificare i geni coinvolti in disturbi cerebrali degli esseri umani se i cambiamenti genetici compromettono la funzionalità dei neuroni. Questi risultati, a loro volta, potrebbero portare alla scoperta di nuovi bersagli per farmaci.

Non tutti però sono disposti a trarre conclusioni sulla mente dei Neanderthal dal DNA. John Hawks, dell'Università del Wisconsin, a Madison osserva che i Neanderthal potrebbero aver avuto varianti di geni che interessavano le loro funzioni cerebrali che tuttavia non hanno controparti con cui confrontarle nelle persone di oggi. Inoltre Hawks nota che se si dovesse dedurre il colore della pelle dei Neanderthal sulla base dei geni che condividono con gli esseri umani bisognerebbe ipotizzare che avessero la pelle scura. Gli scienziati ora però sanno che i Neanderthal avevano alcuni geni non più in circolazione che probabilmente ne schiarivano la pelle. Ma il problema più grande nel tentativo di capire come funzionava il cervello dei Neanderthal a partire dai loro geni, dice Hawks, è che per lo più i ricercatori non sanno come i geni influiscono sul pensiero nella nostra stessa specie. «La genetica non ci dice quasi nulla sulla cognizione nei Neanderthal perché non ci dice quasi nulla sulla cognizione negli esseri umani», afferma.

Dati archeologici

Visti i limiti dell'anatomia fossile e il fatto che la ricerca sui DNA antichi è ancora ai primi passi, molti ricercatori affermano che la finestra migliore di cui disponiamo per affacciarsi sulla mente dei Neanderthal è la documentazione culturale che questi umani estinti si sono lasciati alle spalle. Per lungo tempo quella documentazione non ha disegnato un ritratto particolarmente lusinghiero dei nostri cugini scomparsi. Gli esseri umani europei dei primordi hanno lasciato eleganti espressioni artistiche, attrezzi complessi e resti di pasti che testimoniano una capacità di sfruttare un'ampia varietà di animali e piante che ha permesso loro di

adattarsi a nuovi ambienti e mutamenti climatici. I Neanderthal, al contrario, sembravano mancare di arte o altri reperti simbolici; in confronto i loro attrezzi erano semplici e sembravano limitati a una strategia alimentare strettamente basata sulla caccia di grandi animali. Intrappolati nel loro stile di vita, si pensava, i Neanderthal semplicemente non avevano potuto adattarsi al deterioramento delle condizioni climatiche e alla competizione degli invasori moderni.

Negli anni novanta, però, gli archeologi hanno cominciato a trovare prove in contraddizione con questa ricostruzione, ovvero oggetti decorativi e attrezzi progrediti attribuiti ai Neanderthal. Fin dall'inizio i ricercatori sono stati in disaccordo sul fatto che questi oggetti fossero o meno invenzioni dei Neanderthal come affermato; il dubbio nasce perché risalgono alla fine della loro esistenza, un'epoca in cui nella zona c'era anche *H. sapiens*. (Gli esseri umani anatomicamente moderni sembrano essere giunti in Europa tra 44.000 e 41.500 anni fa, centinaia di migliaia di anni dopo che vi si erano stabiliti i Neanderthal). Alcuni scettici pensano che gli oggetti sofisticati siano stati prodotti da *H. sapiens* e in seguito siano finiti in mezzo ai resti dei Neanderthal. In alternativa, propongono, i Neanderthal avrebbero potuto copiare gli ingegnosi esseri umani moderni o rubare le loro cose.

Ma questa posizione si sta facendo più difficile da sostenere alla luce di scoperte ottenute negli ultimi anni che mostrano un ingegno dei Neanderthal già prima della diffusione degli esseri umani anatomicamente moderni in Europa. «Il vento è cambiato davvero. Ogni mese ci porta qualcosa di nuovo e sorprendente che i Neanderthal sapevano fare», osserva David Frayer, dell'Università del Kansas. «E le nuove prove mostrano sempre che erano più sofisticati, non rozzi».

Alcune delle scoperte più sorprendenti rivelano pensieri estetici e astratti in culture Neanderthal che precedono l'arrivo di *H. sapiens*. Fra i reperti ci sono incisioni e segni di uso di penne di uccello dalla grotta di Gorham. Ma oggetti di questa natura sono venuti alla luce in siti archeologici di tutta Europa. Nella grotta di Fumane, in Veneto, gli archeologi guidati da Marco Peresani hanno trovato segni dell'uso di penne e una conchiglia fossilizzata di lumaca raccolta a non meno di 100 chilometri di distanza che era stata colorata in rosso, appesa a una cordicella e indossata come pendente non meno di 47.600 anni fa. Cueva de los Aviones e Cueva Antón, nella Spagna sud-orientale, hanno restituito conchiglie marine con tracce di pigmento. Alcune sembrano aver fatto da recipienti in cui miscelare e conservare pigmenti di colore rosso, giallo e nero brillante, forse dei cosmetici; altre hanno fori che indicano che erano indossate come gioielli. Le conchiglie così trattate sono datate a 50.000 anni fa.



Le grotte di Gibilterra (sopra) ospitavano Neanderthal sofisticati. Un graffito trovato in una delle grotte (a destra) si aggiunge alle prove del pensiero simbolico dei Neanderthal.

Altri reperti dei Neanderthal indicano che la passione di questi umani estinti per le decorazioni risale ad ancora più indietro nel tempo. Vari siti in Francia e in Italia documentano una tradizione di raccolta di artigli d'aquila che va da 90.000 a 40.000 anni fa. I segni di taglio sulle ossa mostrano che ai Neanderthal interessava proprio procurarsi gli artigli, non la carne. Queste scoperte hanno portato i ricercatori a concludere che i Neanderthal cacciavano l'aquila per motivi simbolici, probabilmente per adornarsi dei suoi impressionanti artigli, non alimentari.

Indizi ancora più antichi riguardo alle preoccupazioni estetiche dei Neanderthal vengono dal sito olandese di Maastricht-Belvedere, dove gli archeologi hanno trovato piccole gocce di ocra rossa, od ossido di ferro, in depositi risalenti come minimo a 250.000-200.000 anni fa. Il pigmento era stato finemente tritato e disperso in un liquido, che poi era gocciolato a terra. I ricercatori non possono sapere con certezza che cosa facessero quei Neanderthal con quel liquido rosso, ma che colorassero qualcosa è un'ovvia possibilità. In effetti, quando viene scoperta ocra rossa nei siti dei primi esseri umani moderni, i ricercatori ipotizzano che fosse usata a fini decorativi.

Oltre a dipingere un ritratto assai più luminoso del nostro denigrato cugino, queste nuove scoperte ci danno indicazioni cruciali sulla mente dei Neanderthal. Da tempo gli archeologi considerano l'arte, comprese le decorazioni del corpo, un indicatore chiave della presenza di abilità cognitive moderne, perché significa che gli artisti avevano la capacità di concepire qualcosa in astratto e poi di tradurre in simboli la relativa informazione. Il pensiero simbolico è alla base della nostra capacità di comunicare attraverso il linguaggio, uno dei tratti che definiscono gli esseri umani moderni e che è visto come tratto critico per il nostro successo di specie.

Se i Neanderthal pensavano simbolicamente, come sembra abbiano fatto, allora probabilmente avevano anche il linguaggio. In effetti, il pensiero astratto potrebbe essere emerso nella linea di discendenza umana ancora prima dell'ultimo antenato comune tra Neanderthal e *H. sapiens*: nel dicembre scorso un gruppo di ricercatori ha mostrato per la prima volta un guscio di cozze proveniente dall'Indonesia che secondo loro era stato inciso con uno schema geometrico da un antenato molto più primitivo, *Homo erectus*, intorno a 500.000 anni fa.

Il pensiero simbolico non è però l'unico componente del comportamento che si ritiene abbia aiutato *H. sapiens* ad avere successo. Un altro è la fabbricazione di utensili complessi, che sembra i Neanderthal abbiano padroneggiato allo stesso modo. Nel 2013 Marie Soressi, dell'Università di Leida, nei Paesi Bassi, e collaboratori hanno annunciato di aver scoperto utensili di osso det-



ti lisciatoi – analoghi a quelli che ancora oggi si usano le persone che lavorano pelli animali per renderle più morbide, lucide e resistenti agli elementi – in due siti neanderthaliani del dipartimento francese della Dordogna datati fra 53.000 e 41.000 anni fa. A giudicare dai segni di usura degli strumenti, i Neanderthal li usavano per lo stesso scopo. Fabbricavano questi attrezzi a partire da costole di cervo, arrotondandone l'estremità che si collega allo sterno, e li usavano premendola sulla pelle asciutta ad angolo acuto e passandola ripetutamente su tutta la superficie, in modo da lisciarsi e ammorbidente.

Nuove prove dell'ingegnosità dei Neanderthal sono venute alla luce anche nel sito di Abri du Maras, nella Francia meridionale, che dava rifugio ai Neanderthal 90.000 anni fa. L'analisi microscopica di utensili in pietra provenienti dal sito, effettuata da Bruce Hardy, del Kenyon College, e colleghi, ha rilevato tracce di un gran numero di attività che un tempo erano ritenute precluse a questa specie. Il gruppo ha trovato per esempio resti di fibre vegetali attorcigliate che dovevano essere state usate per realizzare corde, con cui poi fare reti, trappole o borse. Sono state trovate anche tracce di legno che suggeriscono che i Neanderthal lo usavano per fabbricare attrezzi.

L'analisi dei residui smentisce anche l'idea secondo cui i Neanderthal fossero pericolosamente schizzinosi nelle scelte alimentari. Studi sulla costituzione chimica dei loro denti, insieme all'analisi dei resti di animali dei siti neanderthaliani, hanno fatto ipotizzare che i Neanderthal cacciassero di preferenza prede grandi e pericolose come mammut e bisonti, invece di un'ampia



Questo attrezzo in osso per la lavorazione del pellame, fotografato da quattro lati, è fra gli strumenti avanzati realizzati dai Neanderthal.

gli animali più facili da cacciare, sarebbero diminuite sempre più, e i nostri antenati avrebbero dovuto sviluppare nuovi strumenti con cui procurarsi altri alimenti. Quando in seguito hanno portato questa tecnologia avanzata fuori dall'Africa e in Eurasia, sono stati in grado di sfruttare l'ambiente in modo più efficiente rispetto ai Neanderthal che già abitavano in quelle regioni. In altre parole, gli esseri umani moderni avrebbero affinato le proprie tecniche di sopravvivenza in circostanze più competitive rispetto a quelle dei Neanderthal, traendone vantaggio una volta entrati nel loro territorio.

varietà di animali in funzione delle disponibilità, come facevano gli esseri umani anatomicamente moderni. Ma a quanto pare i Neanderthal di Abri du Maras sfruttavano un variegato gruppo di prede, compresi animali piccoli e veloci come conigli e pesci, specie che erano state ritenute fuori dalla portata dei Neanderthal, con le loro attrezzature a bassa tecnologia.

Alcuni ricercatori hanno sostenuto che la capacità di vivere in parte di alimenti vegetali abbia dato a *H. sapiens* un vantaggio sui Neanderthal, consentendo alla nostra specie di ottenere più risorse alimentari da una determinata area. (Vivere di vegetali è più difficile per gli esseri umani rispetto agli altri primati, perché il nostri grandi cervelli richiedono molte calorie ma i nostri intestini ridotti non sono adatti a digerire grandi quantità di materiale grezzo: questa combinazione richiede una conoscenza approfondita dei cibi vegetali e della loro preparazione.) Ma i Neanderthal di Abri du Maras raccoglievano piante commestibili, fra cui pastinaca e bardana, e anche funghi commestibili. E non erano da soli.

Secondo gli studi effettuati da Amanda Henry del Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia, i Neanderthal di una vasta fascia dell'Eurasia, dall'Iraq al Belgio, mangiavano varie piante. Esaminando tartaro di denti di Neanderthal e residui su attrezzi di pietra, Henry ha determinato infatti che i Neanderthal consumavano specie strettamente imparentate con frumento e orzo di oggi, cuocendole per renderle più commestibili. Inoltre la ricercatrice ha trovato frammenti di amido provenienti da tuberi e da composti di palma da dattero. La somiglianza con quello che si trova nei primi siti degli esseri umani moderni è strabiliante. «Comunque provassimo a separare i dati, non c'erano differenze significative tra i due gruppi», osserva Henry. «Le prove di cui disponiamo oggi non suggeriscono che i più antichi esseri umani moderni dell'Eurasia fossero più abili dei Neanderthal nello sfruttare alimenti vegetali».

Un lungo addio

Se davvero i Neanderthal si comportavano in modi che una volta erano ritenuti tipici solo degli esseri umani anatomicamente moderni e che hanno sostenuto la conquista del mondo di *H. sapiens*, questa somiglianza rende ancora più sconcertante il declino e infine l'estinzione dei Neanderthal. Perché loro si sono estinti e *H. sapiens* è sopravvissuto? Secondo una teoria, gli esseri umani moderni avevano a disposizione una maggior varietà di strumenti che potrebbero aver aumentato le rese della ricerca di cibo. Gli esseri umani moderni si sono evoluti in Africa, in popolazioni di dimensioni maggiori rispetto a quelle dei Neanderthal, spiega Henry. Con più bocche da sfamare, le risorse preferite, come

Le maggiori dimensioni delle popolazioni di *H. sapiens* non si limitarono a spronare l'innovazione, ma contribuirono a mantenere vive le nuove tradizioni, impedendo che scomparissero con gli ultimi sopravvissuti di qualche piccolo gruppo isolato. Le popolazioni più numerose e meglio collegate di *H. sapiens* «hanno provocato un crescente accumulo irreversibile delle conoscenze, in modo più efficiente rispetto ai gruppi umani precedenti, compresi i Neanderthal», propone Chris Stringer, del Natural History Museum di Londra. Comunque, l'arrivo degli esseri umani moderni non significò l'immediata fine dei Neanderthal. L'ultimo tentativo di ricostruirne il declino, eseguito da Thomas Higham, dell'Università di Oxford, e colleghi ha usato i metodi di datazione più avanzati per stabilire con precisione l'età di decine di siti di Neanderthal e dei primi esseri umani moderni in tutta Europa, dalla Spagna alla Russia. I risultati indicano che i due gruppi hanno condiviso il continente per un periodo durato tra 2600 e 5400 anni, prima della definitiva scomparsa dei Neanderthal, intorno a 39.000 anni fa.

In questo lungo periodo di sovrapposizione ci sarebbe stato tutto il tempo per accoppiamenti tra i due gruppi. Le analisi del DNA hanno trovato che le persone che oggi vivono fuori dall'Africa hanno in media tra l'1,5 e il 2,1 per cento di DNA neanderthaliano, eredità degli incontri fra i Neanderthal e gli esseri umani anatomicamente moderni avvenuti decine di migliaia di anni fa, quando questi ultimi iniziarono a diffondersi fuori dall'Africa.

Forse, propone qualche esperto, il mix tra la piccola popolazione dei Neanderthal e quella più numerosa degli esseri umani moderni ha portato alla fine dei primi, travolgendone il patrimonio genetico. «Non erano mai stati in tanti, c'erano persone che arrivavano da altri posti e si mescolavano con loro, e via via sono svaniti», ipotizza Fayer. Che aggiunge: «È la storia di tutte le forme di vita: si estinguono. Non significa necessariamente che fossero stupidi, o incapaci dal punto di vista culturale o dell'adattamento. È solo che le cose vanno così».

PER APPROFONDIRE

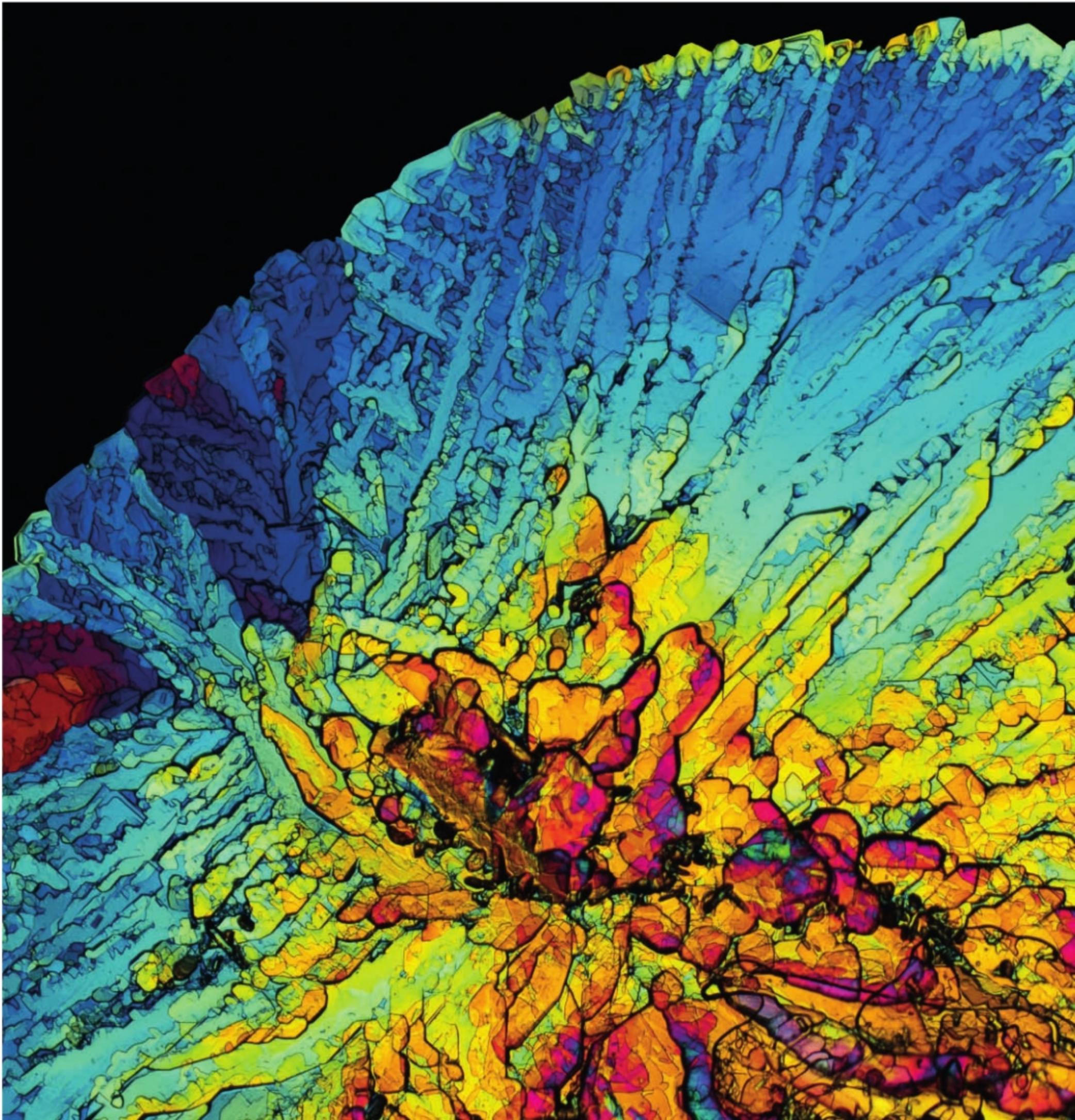
Brain Development after Birth Differs between Neanderthals and Modern Humans. Gunz P. e altri, in «Current Biology», Vol. 20, n. 21, pp. R921-R922, 9 novembre 2010.

Impossible Neanderthals? Making String, Throwing Projectiles and Catching Small Game during Marine Isotope Stage 4 (Abri du Maras, France). Hardy B.L. e altri, in «Quaternary Science Reviews», Vol. 82, pp. 23-40, 15 dicembre 2013.

A Rock Engraving Made by Neanderthals in Gibraltar. Rodríguez-Vidal J. e altri, in «Proceedings of the National Academy of the Sciences», Vol. 111, n. 37, pp. 13.301-13.306, 16 settembre 2014.

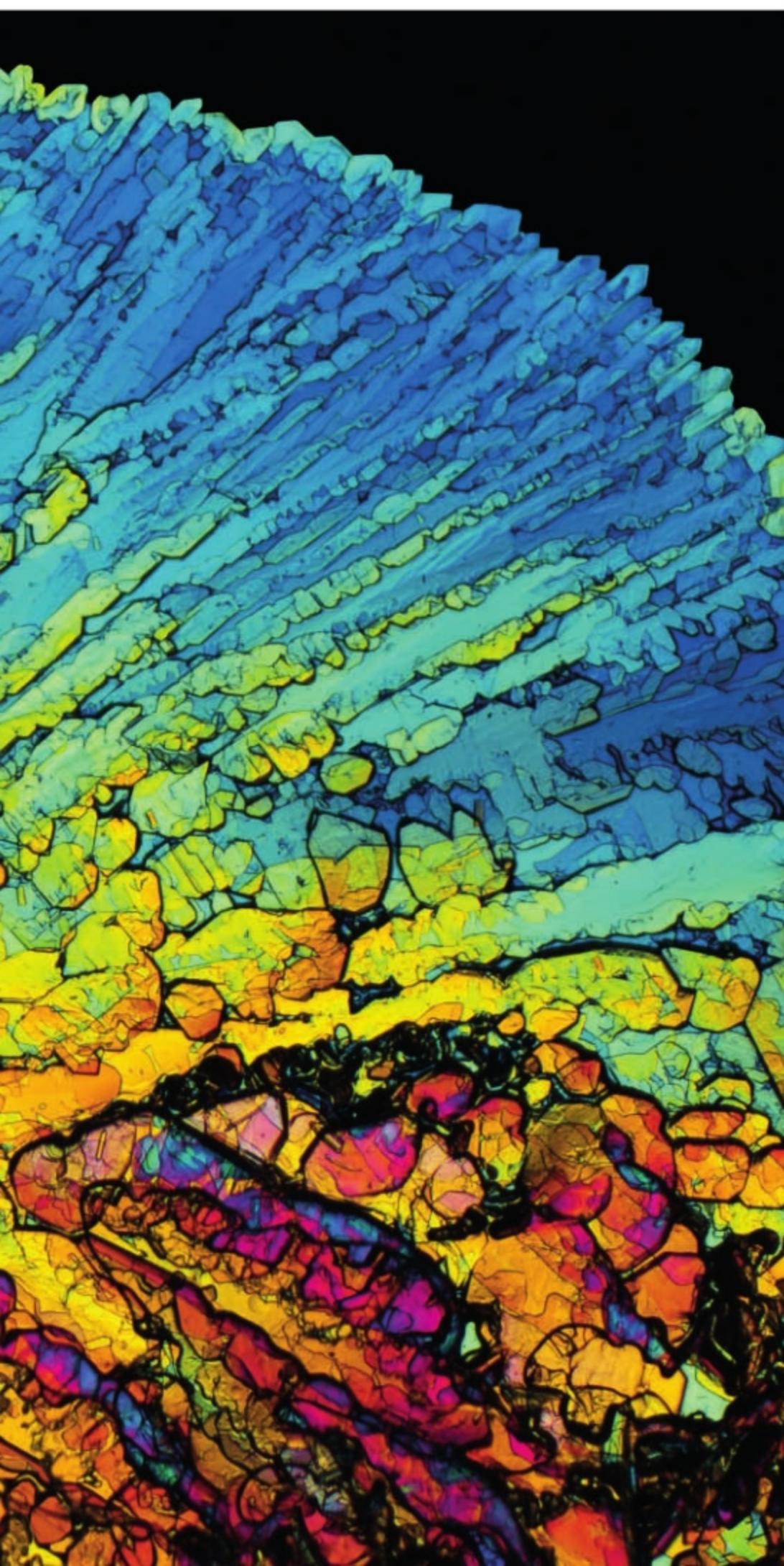
Il crepuscolo dei Neanderthal. Wong K., in «Le Scienze» n. 493, settembre 2009.

OGM in medicina: il tesoro sprecato



L'ingegneria genetica trasforma microrganismi e piante in reattori per produrre farmaci e vaccini, ma la ricerca italiana in questo campo è frenata da leggi inadeguate, che danneggiano anche l'economia

di Lisa Signorile



Il primo farmaco della storia ottenuto da organismi geneticamente modificati (OGM) fu l'insulina, approvata dalla statunitense Food and Drug Administration (FDA) nel 1982, quella iniettabile che oggi è somministrata ai diabetici. L'arrivo dell'insulina da OGM segnò il punto d'inizio per lo sviluppo a scopo medico delle tecnologie ricombinanti, grazie a cui possiamo isolare e tagliare brevi sequenze di DNA e poi inserirle nel genoma di altre cellule per modificarne uno o più geni. Dopo essere stata a lungo estratta da mucche e maiali, dagli anni settanta l'insulina è ottenuta inserendo il gene dell'insulina umana in un batterio, *Escherichia coli*, o in un lievito; poi i microrganismi sono lasciati crescere in appositi fermentatori. L'insulina così ottenuta, anzi i vari tipi di insulina opportunamente ingegnerizzati per fare fronte a differenti necessità cliniche, sono purificati e messi in commercio. Tutto questo riduce i rischi di allergie, frequenti in passato, e aumenta la tolleranza clinica al farmaco.

Vista l'esperienza dell'insulina, presto seguirono altri farmaci ottenuti da tecnologie che usavano il cosiddetto DNA ricombinante inserito in batteri, per esempio il fattore della crescita per bambini con problemi dello sviluppo osseo. Fino al 1985 l'alternativa era stata prelevare il fattore dalla ghiandola pituitaria di cadaveri e incorrere nel rischio di sindrome di Creutzfeldt-Jacob, il morbo della mucca pazza. Un'altra conquista fu l'interferone, ottenuto sempre dai batteri modificati che hanno segnato una svolta per la cura dell'epatite C, e in tempi recenti un farmaco antimalarico di ultima generazione, mentre sono allo studio batteri transgenici per la produzione di farmaci antidolorifici oppioidi.

I microrganismi non sono i soli a poter essere usati come reattori biologici, ovvero per far crescere e moltiplicare il gene di una proteina che manca nei pazienti. Per esempio il fattore VIII della coagulazione del sangue, che manca negli emofiliaci, e l'attivatore tissutale del plasminogeno (tPA), importante per salvare la vita a pazienti con attacchi cardiaci o ictus, sono prodotti inserendo i relativi geni in cellule di mammifero in coltura.

La malaria potrebbe essere prevenuta con zanzare GM, che portano il gene di una proteina che blocca l'ingresso del plasmodio responsabile della malattia nel suo insetto vettore e che possono trasmettere questo carattere ad altre zanzare. Da cellule di carota GM in coltura si ricava infine il farmaco per la malattia di Gaucher, un disordine metabolico ereditario piuttosto serio.

Dato che prevenire è meglio che curare, anche diversi vaccini sono allo studio o sono stati ottenuti da OGM. Per esempio, in fase ancora sperimentale ci sono la banana che contiene il vaccino commestibile per l'epatite B (l'attuale vaccino anti-epatite B iniettabile è ottenuto invece da «banali» batteri ricombinanti), il vaccino per l'influenza prodotto da un bruco di falena a cui è aggiunto anche un gene di un virus degli insetti per produrre maggiori quantità di antigene, una molecola in grado di innescare la formazione di anticorpi, vaccini per AIDS, tubercolosi e cancro. Inoltre nell'estate 2014 un «cocktail» di anticorpi monoclonali prodotto in piante di tabacco infettate con un virus GM è stato somministrato in via sperimentale negli Stati Uniti ai due medici infettati da Ebola in Liberia, salvando loro la vita. Il farmaco, che si chiama Zmapp, è ancora in attesa di approvazione da parte della FDA.

Colori polarizzati. Cristalli di insulina al microscopio a luce polarizzata. La produzione di questa sostanza con tecniche di ingegneria genetica ha aperto la strada all'uso degli OGM nello sviluppo di farmaci e vaccini.

La ricerca in Italia

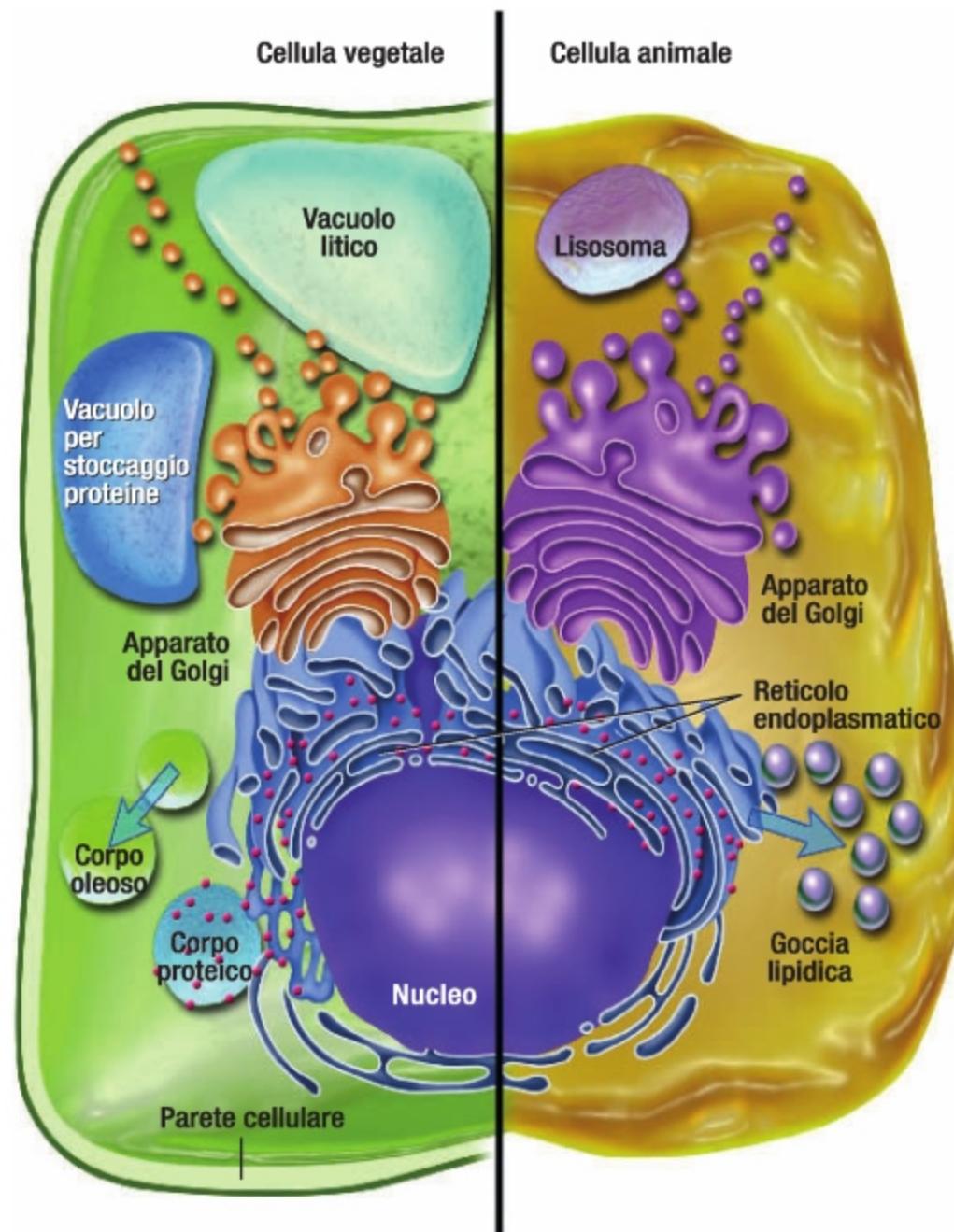
Nel nostro paese diversi enti pubblici di ricerca, come il Consiglio nazionale delle ricerche (CNR) e l'ENEA, svolgono studi di punta sugli OGM. Per esempio l'Istituto di biologia e biotecnologia agraria (IBBA) del CNR di Milano ha collaborato dal 2004 al 2011 al progetto europeo e sudafricano a scopo umanitario Pharma-Planta, che puntava all'uso di piante, soprattutto tabacco, pomodoro e mais, come bioreattori: le piante sono spesso in grado di produrre proteine farmacologicamente o immunologicamente attive in forma più fedele all'originale e a costi meno elevati rispetto ai sistemi classici che coinvolgono i microrganismi. I batteri non hanno tutte le strutture cellulari presenti nelle cellule degli organismi complessi, quindi spesso le proteine prodotte dai geni impiantati si trovano in un ambiente che non è quello nativo, dove è facile che si alterino o che vengano degradate.

Localizzazione e stabilità della proteina derivata da DNA ricombinante sono due dei problemi fondamentali da affrontare quando la si vuole produrre in un altro organismo. «Ogni proteina è prodotta in determinate quantità», spiega Emanuela Pedrazzini, ricercatrice all'IBBA. «Ma, a seconda della sua funzione, può essere più o meno stabile nel comparto di destinazione. L'equilibrio fra sintesi e degradazione è chiamato *protein turnover*, e determina i livelli di accumulo della proteina stessa. Nelle cellule vegetali la degradazione delle proteine avviene nel citoplasma, tramite un complesso enzimatico denominato proteasoma, oppure nei vacuoli litici, organelli che raccolgono e degradano la spazzatura cellulare. Se esprimo una proteina in un sistema eterologo, per esempio una proteina di un virus animale in un vegetale, non è detto che il suo turnover sia lo stesso che nell'ambiente nativo, quindi i livelli di accumulo possono variare». Non essendo soggetti all'azione dei vacuoli litici o dei proteasomi, membrane e comparti intracellulari possono offrire protezione alle molecole di interesse farmacologico: facendo in modo che le proteine si inseriscano dentro queste strutture, si ottiene una quantità di farmaco o vaccino molto più grande. La grande quantità di materiale ottenibile e la facilità di coltivazione delle piante, oltre a possibili motivi etici, le rendono preferibili agli animali come bioreattori.

Sono vari gli studi portati avanti dall'IBBA nell'ambito di Pharma-Planta, e includono la produzione di vaccini e farmaci. Un progetto interessante riguardava una nuova strategia per aumentare l'accumulo dell'antigene Nef, una proteina dell'HIV, in pianta di tabacco per creare un vaccino. Nef è una delle prime proteine prodotte dal virus dopo l'infezione, e neutralizza l'attività delle cellule che intervengono nella prima fase della risposta immunitaria dell'ospite, in modo che l'HIV possa propagarsi indisturbato. Per questa funzione, Nef è considerato un buon candidato per sviluppare un vaccino anti-HIV: se Nef è bloccato, il sistema immunitario può rispondere all'attacco virale. Quando l'HIV infetta una cellula animale, Nef è localizzato nel citoplasma.

Il gruppo di ricercatori italiani che si è occupato di questo studio, coordinato da Alessandro Vitale dell'IBBA, ha pensato di for-

Lisa Signorile, laureata in biologia, vive nel Regno Unito, dove ha conseguito un Master in Forestry Protection e un Ph.D. in genetica delle popolazioni all'Imperial College di Londra. È autrice di vari libri di zoologia ed evoluzione.



Comparti diversi. A sinistra, una cellula vegetale, a destra una cellula animale. La differenza fra i compatti cellulari è importante quando si esprime una proteina animale in una pianta.

nire a Nef un biglietto del «treno» con destinazione il comparto intracellulare chiamato reticolo endoplasmatico, dove può essere accumulato in grandi quantità, utilizzando due strategie differenti. La prima, ideata da Pedrazzini, usa un segnale di targeting (si veda il box nella pagina a fronte) che ancora Nef alla membrana del reticolo dal lato esterno del comparto, in modo che rimanga a contatto con il citoplasma. La seconda si basa sulla fusione del gene Nef con il gene per una proteina chiamata zeolina, composto dalla fusione dei geni per le due principali pro-

IN BRIEVE

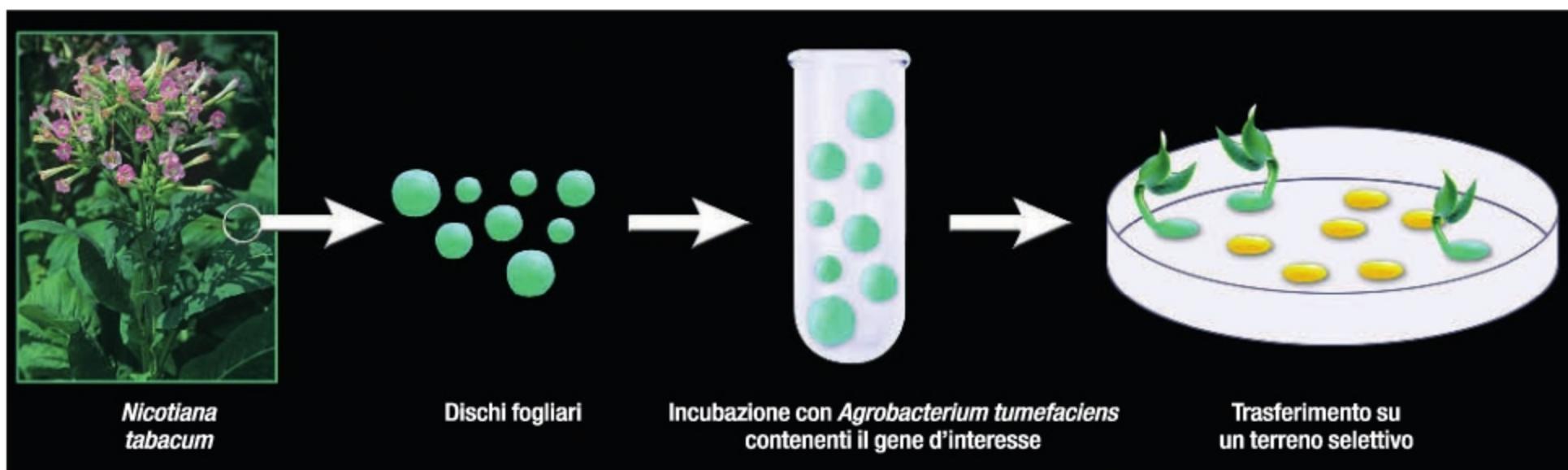
Quando si pensa agli organismi geneticamente modificati (OGM) e alle problematiche collegate a questa tecnologia si dà per scontato che si parli di agricoltura, di alimentazione o di allevamento.

Gli organismi geneticamente modificati hanno in realtà anche un ruolo fondamentale, sebbene non riconosciuto, nel garantire il nostro benessere: sono infatti alla base della produzione di molti

vaccini e farmaci che salvano vite umane.

Tuttavia, la sperimentazione degli OGM in Italia e in Europa è in molti casi regolata dalle stesse leggi che regolano la ricerca sugli OGM in

campo alimentare, costringendoci a volte ad acquistare dall'estero farmaci ottenuti sulla base di studi effettuati da scienziati italiani mai completati, con un danno per la ricerca e l'economia del nostro paese.



VERSO LA GIUSTA DESTINAZIONE

I segnali di targeting: un treno verso la salvezza

Un problema davanti a cui si sono trovati i ricercatori è come convincere la proteina che si vuole produrre a entrare nel compartimento cellulare desiderato. Il «biglietto» per garantire il trasporto e aprire la porta di ogni compartimento è costituito dai cosiddetti «segnali di targeting». Questi segnali sono informazioni contenute nella proteina stessa e codificate dal gene corrispondente. Tramite la tecnologia del DNA ricombinante è possibile isolare il frammento di DNA che contiene le istruzioni su come fabbricare il biglietto del treno e impiantarlo sul frammento di DNA che contiene l'informazione per fabbricare un farmaco. Così, questo biglietto sarà parte integrante del farmaco e la destinazione finale sarà quella decisa dai ricercatori.

«Una proteina che non ha nessun segnale di targeting – spiega Emanuela Pedrazzini dell'IBBA di Milano – rimane nel citoplasma, dove rischia di essere demolita dal proteasoma. Lo stesso potrebbe accadere se la proteina contiene segnali di targeting per il vacuolo, dove è possibile che sia in gran parte degradata; in entrambi i casi se ne riuscirà a produrre poca, e questa è una situazione da evitare. Poiché i vari compartimenti hanno caratteristiche differenti, si deve cercare quello più idoneo in cui la proteina si mantiene nella struttura nativa».

teine di riserva del fagiolo e del mais: questo conferisce stabilità alla proteina Nef e ne aumenta la resa.

Una volta ottenuta una grande quantità di antigene Nef, il passo successivo sarebbe iniettarlo come vaccino nei pazienti per stimolarne la reazione del sistema immunitario e insegnare agli anticorpi a riconoscere la proteina virale e attaccarla. Sfortunatamente sembra che Nef da solo non sia sufficiente a stimolare il sistema immunitario, quindi il prossimo passo sarebbe comporre un cocktail di antigeni diversi da somministrare insieme. Le ricerche però sono bloccate alla fase di sperimentazione, non potendo sostenere i costi di grandi serre a contenimento per la coltivazione delle piante di tabacco su media e grande scala.

«La strategia di ancoraggio dell'antigene alla membrana del reticolo endoplasmatico – spiega Pedrazzini – è stata anche usata per produrre un vaccino contro la tubercolosi bovina in piante di tabacco, con alte rese e bassi costi, usando un antigene ricombinante che deriva da *Mycobacterium bovis*, agente della tubercolosi bovina. Questo perché attualmente c'è solo un vaccino con-

Se il tabacco fa bene. Ecco come ottenere una pianta di tabacco geneticamente modificata con il metodo del trasferimento nucleare.

tro la tubercolosi bovina, il Calmette-Guérin BCG, che consiste nel batterio inattivato e non protegge al 100 per cento. In questo caso l'antigene ricombinante è un mix di vari frammenti di DNA che inducono la risposta immunitaria nell'ospite».

La tubercolosi causa moltissimi danni all'allevamento di bovini, che bisogna abbattere se si ammalano, e può passare dai bovini all'essere umano tramite il latte non pasteurizzato, quindi è un problema sanitario principalmente nelle aree rurali del pianeta. Sfortunatamente, «i semi di queste piante transgeniche sono qui inutilizzati nel mio laboratorio», dice Pedrazzini, sconsolata dall'impossibilità di procedere a una fase sperimentale con coltivazione delle piantine, come si dirà tra breve.

Il gruppo CNR di Teodoro Cardi, attualmente direttore del Centro di ricerca per l'orticoltura di Pontecagnano, ha lavorato invece all'espressione dell'antigene ricombinante A27L per la produzione di un vaccino contro il vaiolo. La malattia è teoricamente estinta, ma due ceppi del virus sono custoditi a scopo di ricerca negli Stati Uniti e in Russia. Dopo l'11 settembre, la paura di un attacco bioterroristico ha fatto sì che i paesi stanziassero fondi per essere pronti con *stock* di vaccini per un'eventuale emergenza. L'Italia, tramite l'Istituto superiore di Sanità (ISS), ha avviato un programma di ricerca su malattie infettive di rilievo sociale causate da agenti di possibile impiego come armi non convenzionali, nel cui ambito dal 2007 al 2009 si è sviluppato il progetto di ricerca per prepararsi, grazie a strategie vaccinali innovative, ad attacchi bioterroristici con agenti virali. Per questo progetto il gruppo di Cardi ha trasformato le piante di tabacco in modo differente: invece di aggiungere i geni del virus del vaiolo al nucleo della cellula vegetale, li ha aggiunti all'anellino di DNA contenuto nei cloroplasti, gli organelli responsabili della fotosintesi. Uno dei vantaggi è che il polline, non avendo cloroplasti, non porta in giro il transgene, quindi non c'è rischio di contaminazione di altre piante, neanche accidentale. Inoltre in questo modo la produzione di antigene del vaiolo è anche 500 volte maggiore che nel nucleo.

Gruppi statunitensi hanno effettuato ricerche analoghe per produrre vaccini per antrace e peste, e hanno calcolato che 0,4 ettari di piante transgeniche con cloroplasti trasformati, sebbene crescano meno bene e più lentamente, possono produrre fino a 360 milioni di dosi di vaccino per l'antrace purificato. Con otto ettari si potrebbe vaccinare l'intera umanità contro il rischio di antrace.

Un'altra ricerca italiana guidata da Mario Pezzotti, dell'Università di Verona, nell'ambito del progetto Pharma-Planta riguardava la produzione di un enzima (GAD65) coinvolto nel diabete

Biotecnologie low cost contro Big Pharma

L'unica serra di contenimento per la coltivazione su scala medio-piccola di piante transgeniche autorizzata in Italia dal Ministero della Salute è a Roma, presso il laboratorio di biotecnologie del Centro ricerche Casaccia dell'ENEA. In questi 250 metri quadrati il responsabile, Eugenio Benvenuto, e il suo gruppo di 13 ricercatori sperimentano la trasformazione di un progenitore della pianta del tabacco, *Nicotiana benthamiana*, per produrre farmaci e vaccini. Hanno messo a punto, per esempio, tecniche per esprimere in pianta un anticorpo monoclonale contro la tenascina C, un marcitore tumorale importante nei processi di neo-vascolarizzazione in vari tipi di tumore. Hanno anche trovato il modo di accumulare in pianta anticorpi antifungini da usare come terapia contro la candida, e hanno messo a punto una tecnica sperimentale per produrre vaccini partendo da virus vegetali privati del loro DNA, e quindi in grado di trasportare antigeni ma non di replicarsi.

Sfortunatamente anche in questo caso le ricerche si fermano prima dei trial clinici, con semi che promettono farmaci e vaccini ad alta resa e bassissimo prezzo ma restano chiusi in un cassetto. «Soffriamo della mancanza di finanziamenti e di crescita scientifica», si lamenta Benvenuto. «Noi usiamo le stesse tecnologie che usano i colleghi per produrre piante trasformate per altro scopo, e tutto il settore risente del blocco delle ricerche sugli OGM. Sono anni che non riceviamo finanziamenti dallo Stato».

Le ricerche, spiega, si fermano ai modelli preclinici: i trial clinici hanno costi proibitivi per un laboratorio pubblico. Anche depositare un brevetto è costoso, e richiede la certezza che qualcuno interessato, come un'azienda farmaceutica privata, lo acquisisca. «Le piante transgeniche sono un modo *low cost* per produrre molecole di importanza farmacologica», chiarisce Benvenuto. «Big Pharma non ha interesse al fatto che il costo sia più basso, ha investito moltissimo sui fermentatori e ha interesse a mantenere costi elevati per incrementare i ricavi, il che è in contrasto con la nostra filosofia, che è quella di abbassare i costi dei prodotti farmaceutici. Nei paesi occidentali il principio dell'accessibilità di tutti alle cure non è molto condiviso».

Negli Stati Uniti, per motivi di sicurezza nazionale, è stato permesso di produrre milioni di dosi di un vaccino contro l'influenza H1N1 in pianta, perché era necessario produrlo velocemente. Anche il cocktail di anticorpi contro Ebola somministrato ai due medici statunitensi, poi guariti, è stato prodotto grazie a piante transgeniche. «Il messaggio – dice Benvenuto con un cenno di frustrazione nella voce – è che quando c'è un'emergenza allora le piante si possono usare, anche aggirando alcuni controlli, ma finché non c'è un'emergenza questa tecnologia non è presa in considerazione nel mondo occidentale perché ci sono altri modi per produrre queste molecole e farle pagare di più».

mellito di tipo 1, quello giovanile, usando ancora una volta tabacco transgenico. Questo enzima, prodotto in cellule di lepidottero, ovvero falene, infettate con un virus GM dall'azienda svedese Diamyd Medical, è in sperimentazione clinica di fase III per il suo uso terapeutico. Se questi trial si dimostreranno efficaci, sarà necessario produrre grandi quantità di questa sostanza in breve tempo, e la produzione in piante GM potrebbe essere una soluzione.

Gli OGM e la legge

Nonostante le piante transgeniche rappresentino una delle più rilevanti innovazioni in ambito biomedico, e nonostante le loro grandi potenzialità di salvare milioni di vite, la ricerca si blocca spesso alla fase sperimentale in laboratorio. Le leggi europee e italiane, a differenza di quanto accade per esempio nel continente americano, sono severe e restrittive nei confronti delle piante geneticamente modificate, poiché applicano il principio di precauzione: l'assenza di prove non è prova di assenza di effetti collaterali su ambiente e salute. Il problema è che provare l'assenza di qualcosa è un paradosso scientifico. Di conseguenza in Europa le posizioni non sono mai state omogenee: si va dal Regno Unito, aperto alla sperimentazione, all'Italia, in cui 16 Regioni su 20 avevano chiesto alla Commissione Europea di essere OGM free. Per questo a metà gennaio 2015 è stata approvata dalla Commissione Europea una delibera per dare agli Stati membri pieno potere di autoregolamentazione.

«Finora – spiegano Federico Gustavo Pizzetti, professore di istituzioni di diritto pubblico all'Università di Milano, e Francesca Sgrò, assegnista di ricerca in diritto costituzionale – la disciplina di riferimento era stata controllata da direttive europee recepite dal nostro paese. In sostanza, era ammessa la sperimentazione per finalità mediche e terapeutiche degli OGM anche in Italia. C'erano però posizioni differenti in riferimento ai vegetali che entrano nell'alimentazione, per i quali era ammesso il trattamento in laboratori protetti ma non la coltivazione. È ammessa invece la circola-



Tecnologie testate e in prova. Un impianto per la produzione di insulina; in alto a fronte, una coltura di radici che producono farmaci in biofermentatori.



zione di farmaci o campioni di OGM prodotti all'estero da vegetali trattati per finalità terapeutiche, sempre che siano stati superati i controlli previsti dagli enti di controllo europei e nazionali, quali l'Autorità europea per la sicurezza alimentare o l'ISS».

In pratica possiamo acquistare e usare farmaci prodotti da piante GM in altri paesi ma non possiamo produrceli in casa. Non sappiamo che cosa accadrà con la nuova legge europea, ma il *trend* di diffidenza nei confronti degli OGM in Italia sembra ormai chiaro e consolidato per quanto riguarda i prodotti agro-alimentari, e le trasformazioni su vegetali per uso medico seguono purtroppo lo stesso destino, spesso anche per semplice mancanza di conoscenza del problema, per cui il tutto viene accorpatto.

In questo quadro legislativo, racconta Pedrazzini, le ricerche del CNR si fermano alla pubblicazione scientifica dei modelli sperimentati in laboratorio, dato che la maggior parte degli enti pubblici di ricerca non dispone di strutture adeguate come le costose serre di contenimento per la coltivazione delle piante GM, necessarie per ottemperare alla legge: non c'è nessuna speranza che le loro scoperte si trasformino in farmaci, in Italia. L'ENEA di Roma, sotto la direzione di Eugenio Benvenuto, dispone di serre di contenimento attrezzate per la crescita su media scala di piante GM, ma le ricerche si fermano comunque prima della sperimentazione clinica: le aziende farmaceutiche italiane non sono interessate a portare avanti linee di ricerca che durano 10 o anche 15 anni, il tempo medio necessario perché un nuovo farmaco arrivi a disposizione dei pazienti, dato che deve superare una serie di controlli molto rigidi, per vedersele bloccare a metà percorso da leggi che diventano sempre più diffidenti e restrittive verso gli OGM.

I brevetti

Che fare, allora? L'unica soluzione per uscire da questa fase di stallo è brevettare i risultati delle ricerche, e vendere o dare in licenza il brevetto a una casa farmaceutica interessata, nazionale, estera o multinazionale, piuttosto che vedere un vaccino che fun-

ziona e che potrebbe salvare milioni di vite chiuso in un cassetto, senza valide ragioni scientifiche. «Il problema dei brevetti – dice però Pedrazzini – è che rallentano il progresso scientifico, che si basa sullo scambio di informazioni e conoscenze». Brevettare un procedimento o una nuova tecnica richiede tempi molto lunghi; in seguito solo il proprietario del brevetto o il licenziatario potrà usufruirne. In Italia, durante questo lungo periodo, le informazioni relative alla scoperta sono tenute segrete, e quindi non possono contribuire all'avanzamento della conoscenza. Le pubblicazioni scientifiche, che consentono lo «scambio di informazioni», passano a quel punto in secondo piano, e sono ritardate parecchio.

Al contrario di quello che pensano molte persone che si oppongono agli OGM, quindi, gli scienziati non amano brevettare le scoperte, ma sono costretti a farlo da un sistema che si ritorce su se stesso: lo Stato italiano, direttamente o tramite l'Unione Europea, finanzia progetti per migliorare le conoscenze mediche e produrre applicazioni che portano a farmaci o vaccini. Lo stesso Stato però blocca in embrione la ricerca che ha sovvenzionato, costringendo ricercatori ed enti di ricerca a brevettare le loro ricerche e vendere i brevetti all'estero, dove le scoperte fatte in Italia verranno poi trasformate in farmaci o vaccini, che saranno infine acquistati in Italia, con danno per l'economia e la ricerca italiana.

Il progetto Pharma-Planta era stato ideato e sovvenzionato con esclusivi scopi umanitari, e le ricerche erano finalizzate a rispondere a esigenze sanitarie dei paesi poveri o in via di sviluppo, che non possono permettersi di acquistare vaccini ma che avrebbero potuto coltivare piante di tabacco geneticamente modificate per produrre vaccini. In quel caso il brevetto sarebbe stato necessario, in modo da poterne autorizzare l'uso gratuito ai paesi poveri, impedendo che altri arrivassero alle stesse scoperte vendendone però i prodotti. Sfortunatamente Pharma-Planta, almeno per la parte italiana del progetto, si è concluso con semi abbandonati in un cassetto, soprattutto per mancanza di strutture adeguate per una sperimentazione che, stando così le cose, non avverrà mai.

Certo, l'idea di un vaccino prodotto in piante GM potrebbe suonare come un cocktail esplosivo per molte persone che diffidano dell'una o dell'altra metodologia scientifica. Ma se un vaccino prodotto in piante GM potesse fermare l'epidemia di Ebola, quanti se la sentirebbero di scagliare la prima pietra? Non sarebbe invece il caso di non fare di ogni erba un fascio, e decidere caso per caso l'opportunità di portare avanti la sperimentazione in modo adeguato e con leggi che tengano conto dell'importanza sociale e sanitaria degli OGM a scopo medico? ■

PER APPROFONDIRE

Transgenic Chloroplasts Are Efficient Sites for High-Yield Production of the Vaccinia Virus Envelope Protein A27L in Plant Cells. Rigano M.M., Manna C., Giulini A., Pedrazzini E., Capobianchi M., Castilletti C. e Cardi T., in «Plant Biotechnology Journal», Vol. 7, n. 6, pp. 577-591, 2009.

Anchorage to the Cytosolic Face of the Endoplasmic Reticulum Membrane: a New Strategy to Stabilize a Cytosolic Recombinant Antigen in Plants. Barbante A., Irons S., Hawes C., Frigerio L., Vitale A. e Pedrazzini E., in «Plant Biotechnology Journal», Vol. 6, n. 6, pp. 560-575, 2008.

Recombinant Pharmaceuticals from Plants: the Plant Endomembrane System as Bioreactor. Vitale A. e Pedrazzini E., in «Molecular Interventions», Vol. 5, n. 4, pp. 216-225, 2005.

Assembly, Secretion, and Vacuolar Delivery of a Hybrid Immunoglobulin in Plants. Frigerio L., Vine, N.D., Pedrazzini E., Hein M.B., Wang F., Ma J.K.C. e Vitale A., in «Plant Physiology», Vol. 123, n. 4, pp. 1483-1494, 2000.

Cinquanta sfumature di biotech. Meldolesi A., in «Le Scienze», n. 543, novembre 2013.

La complessa matematica di



I difficili problemi computazionali che si nascondono in questo gioco apparentemente banale potrebbero spiegarne il grande successo

Candy Crush

di Toby Walsh



Si dice che in città ci troviamo sempre a pochi metri di distanza da un topo. Ma di questi tempi sembra più probabile trovarsi sempre a pochi metri di distanza da qualcuno che gioca a Candy Crush Saga. Attualmente è uno dei giochi più popolari su Facebook; è stato scaricato e installato su telefonini, *tablet* e computer più di mezzo miliardo di volte. Anche grazie a questo successo la società che lo sviluppa, Global King, è stata quotata di recente alla borsa di New York con un'offerta pubblica iniziale in cui l'azienda è stata valutata miliardi di dollari. Niente male per un giochino che consiste nello scambiare di posto coppie di caramelle per formare file di tre o più elementi identici.



IN BREVE

L'autore ha dimostrato che Candy Crush, uno dei videogiochi più popolari del momento, è riconducibile alla classe di problemi matematici indicati con la sigla NP. Di questa classe fanno parte molti

altri rompicapi impegnativi, per esempio tracciare le rotte dei camion per consegnare spedizioni.

Si tratta di problemi in cui è facile verificare la soluzione ma è difficile trovarla, infatti il tempo di esecuzione

di un computer che cerca la soluzione cresce in modo spettacolare al crescere delle dimensioni del problema.

Questa difficoltà a trovare una soluzione potrebbe essere uno dei

motivi del successo, e fa di Candy Crush un interessante strumento con cui approfondire uno dei più importanti problemi aperti della matematica, le cui implicazioni si estendono ad applicazioni pratiche.

Buona parte dell'attrattiva di Candy Crush deriva dalle strutture complesse che si nascondono dietro a un rompicapo apparentemente semplice. È un gioco che, sorprendentemente, si rivela di grande interesse anche per i ricercatori: ci aiuta a capire alcuni dei più importanti problemi aperti della matematica, nonché della sicurezza dei sistemi informatici.

Ho dimostrato di recente che Candy Crush è un rompicapo la cui soluzione è difficile dal punto di vista matematico. Per provare questo punto ho fatto ricorso a uno dei concetti più belli e importanti di tutta l'informatica teorica, la riduzione tra problemi.

L'idea consiste nel ricondurre, o appunto «ridurre», la soluzione di un problema a quella di un altro. Alle origini del concetto c'è il fatto che i programmi per computer sono versatili: possiamo usare lo stesso tipo di codice per risolvere più di un problema, addirittura se le variabili sono diverse. Se il problema da cui siamo partiti era difficile, quello a cui ci riconduciamo deve esserlo almeno altrettanto. Il secondo problema non può essere più facile, perché deve essere possibile risolvere il primo con un programma che risolve il secondo. E se mostriamo che vale anche l'inverso, che cioè anche il secondo problema si può ridurre al primo, allora c'è un senso in cui i due problemi hanno la stessa difficoltà e richiedono un tempo simile per essere risolti.

Determinare la difficoltà di un problema è un aspetto fondamentale della matematica, ma non si tratta solo di un interesse teorico. Se riusciamo a classificare un problema in base a quanto è difficile risolverlo sappiamo quanta potenza di calcolo dobbiamo dedicargli, e anche solo se vale la pena di provare a risolverlo. Da un certo punto di vista, considerare Candy Crush come un problema matematico può essere appassionante quanto giocarci.

Soluzioni difficili, verifiche facili

Nella nostra analisi di Candy Crush io e i miei colleghi siamo partiti dalla classe più famosa di problemi computazionalmente difficili, la cosiddetta NP; la sigla significa *non-deterministic polynomial time*, cioè «non deterministico polinomiale», dove il «polinomiale» si riferisce al tempo necessario per risolvere questi problemi. NP contiene tutti i problemi per i quali, se ne viene proposta una possibile soluzione, possiamo verificare rapidamente se è corretta, in un tempo non maggiore di una funzione polinomiale della dimensione del problema. Invece trovare la soluzione prima di tutto sembra computazionalmente arduo. Molti problemi matematici noti – come stabilire se una formula logica complessa si può soddisfare, o se un grafo si può colorare con un certo numero di colori in modo che nodi adiacenti abbiano colori diversi – appartengono a questa classe di problemi computazionalmente difficili.

Al di sotto della classe NP, in termini di complessità, abbiamo la classe P dei problemi computazionalmente «facili». Qui P sta semplicemente per «polinomiale». P contiene problemi come quello di ordinare un elenco o trovare un dato in un banca dati. Il tempo necessario a un programma efficiente per risolvere questo tipo di problemi è breve, addirittura nel peggior dei casi. Matematicamente, il tempo di esecuzione di un problema in P è un polinomio che ha come variabile la «grandezza» del problema. Per esempio, un famoso algoritmo di ordinamento, BubbleSort, fa salire via via gli elementi più piccoli, come se fossero bolle che emergono in superficie. Questo procedimento richiede un tempo che cresce come il quadrato della lunghezza dell'elenco da ordi-

Toby Walsh è direttore di ricerca al Neville Roach Lab del National Information Communications Technology Australia. È professore associato del Dipartimento di Informatica e Ingegneria Informatica dell'Università del Nuovo Galles del Sud, e professore esterno all'Università di Uppsala. L'originale di questo articolo è stato pubblicato su «American Scientist» di novembre-dicembre 2014.



Difficoltà avvincente. In questa schermata di Candy Crush Saga, un potenziamento Bomba Colore sta eliminando tutte le caramelle viola. Parte del motivo per cui questo gioco è così avvincente è che è veramente difficile, dal punto di vista matematico.



nare. Se raddoppiamo la lunghezza dell'elenco, alla peggio l'algoritmo impiega un tempo quadruplo. Il caso peggiore è quello in cui all'inizio la lista è completamente invertita e ogni elemento deve incrociare ogni altro. Se l'elenco non è in questo ordine opposto, l'algoritmo finirà ancora più rapidamente.

Al di sopra di NP, come complessità, ci sono problemi estremamente difficili computazionalmente. Ce ne sono addirittura alcuni per cui il nostro modello computazionale usuale, quello che tutti i nostri computer adottano, è inadeguato. Sono problemi per cui non esiste un programma che sicuramente si arresta e fornisce una

Problemi NP per il popolo

Una scena della serie televisiva *Elementary*, adattamento moderno di Sherlock Holmes, che mostra come i problemi NP hanno penetrato la cultura popolare ben oltre Candy Crush. Nel telefilm due matematici, per celare dai rivali le loro ricerche su $P = NP$, svolgono i calcoli usando pennarelli visibili solo agli ultravioletti, come scopre Holmes (nella foto) dopo che sono stati assassinati per i loro risultati rivoluzionari.



risposta. Questi esempi ricadono nella classe dei problemi cosiddetti indecidibili. Questa classe comprende problemi come quello di stabilire se un dato programma avrà termine oppure procederà all'infinito in qualche *loop*: il cosiddetto problema dell'arresto. Alan Turing, uno dei padri dell'informatica, dimostrò che il problema dell'arresto è indecidibile. Non esiste un programma che sia in grado di decidere se un altro programma si arresti e che, esso stesso, si arresti sicuramente: siamo quindi in presenza di un problema decisamente difficile, dal punto di vista computazionale.

NP è al confine tra facile e difficile. All'interno di NP abbiamo molti problemi impegnativi come quello di tracciare le rotte dei camion per consegnare spedizioni, organizzare i turni del personale di un ospedale o l'orario delle lezioni di una scuola. E si scopre che anche vincere a Candy Crush rientra in questa categoria. Ognuno di questi problemi si può ridurre a ognuno degli altri: da questo punto di vista sono tutti altrettanto difficili.

Purtroppo i migliori programmi che abbiamo per i problemi in NP hanno un tempo di esecuzione che cresce spettacolarmente al crescere delle dimensioni del problema. Sul mio PC ho un programma che impiega qualche ora a trovare i percorsi ottimali per dieci camion e a dimostrare che questa soluzione è la migliore possibile. Ma per 100 camion lo stesso programma ci metterebbe un tempo maggiore dell'età dell'universo. Dal punto di vista matematico, il tempo di esecuzione del mio programma è una funzione esponenziale della grandezza del problema.

E gli esponenziali diventano rapidamente enormi, come illustra la classica leggenda in cui un sultano garantisce al suo visir qualunque ricompensa desideri, e il visir chiede un chicco di grano per la prima casella di una scacchiera, e poi il doppio per ogni

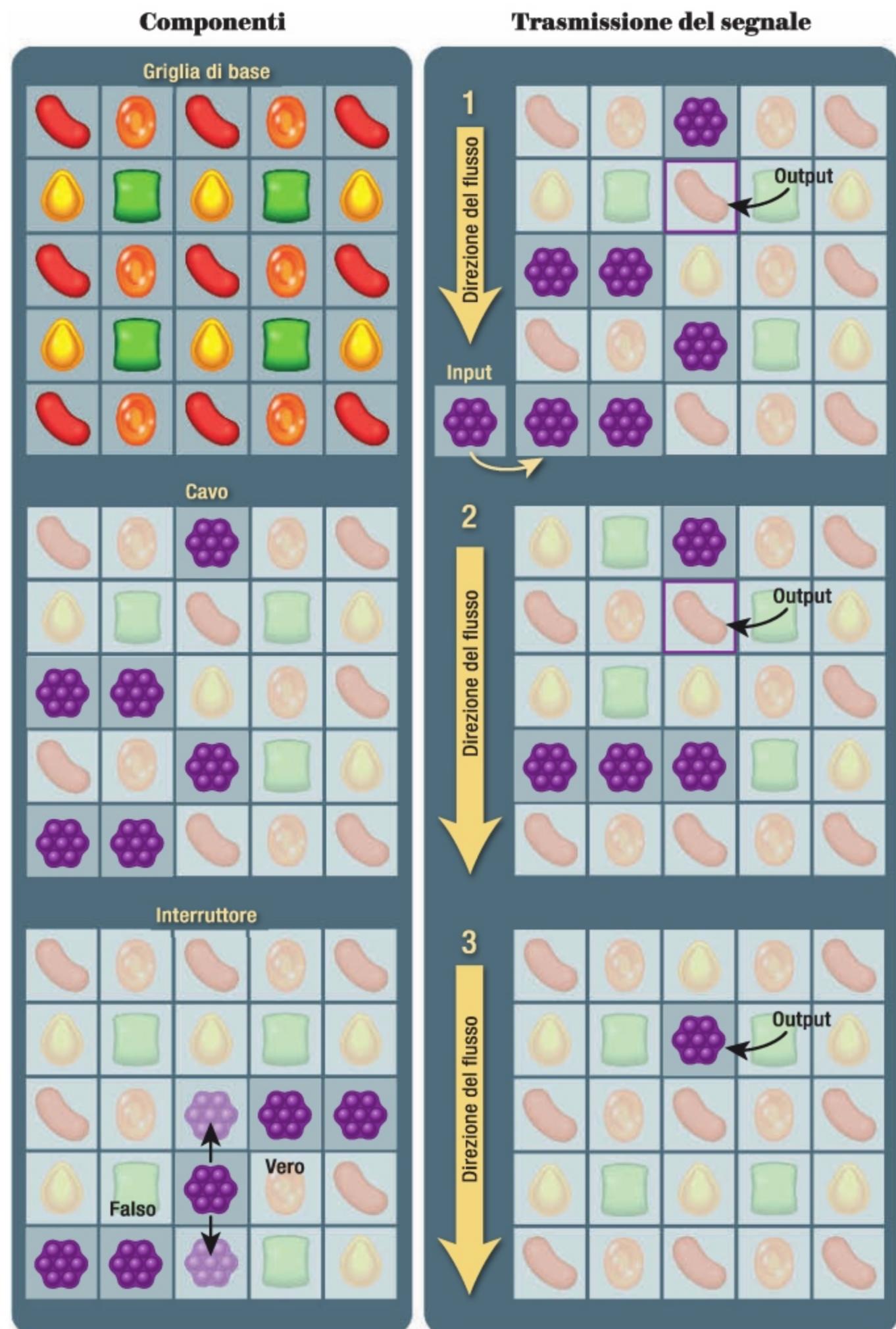
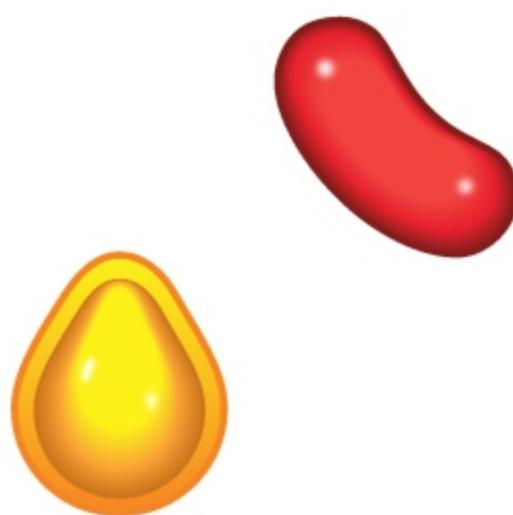
casella successiva. Ci sarà così un chicco sulla prima casella, due sulla seconda, quattro sulla terza e così via. Per tutte e 64 le caselle servirebbero $18.446.744.073.709.551.615$ chicchi di grano, cioè più di 18 miliardi di miliardi. È la quantità di grano prodotta in tutto il mondo in alcuni secoli. Gli esponenziali, per poco che ci distraiammo, ci sovrastano inesorabili.

Sebbene la maggior parte degli informatici sia d'accordo con me sul fatto che i problemi NP sono al confine tra facile e difficile, per ogni specifico problema non c'è un modo per sapere con certezza da che parte sta. Gli attuali migliori programmi richiedono un tempo esponenziale per risolvere i problemi in NP. Ma non possiamo escludere che esista qualche algoritmo esotico in attesa di essere scoperto che risolverà in modo efficiente, in tempo polinomiale, i problemi in NP. (I matematici condensano questo dubbio con « $P = NP?$ ») Questo è proprio uno dei problemi aperti più famosi e importanti della matematica odierna. Il Clay Mathematics Institute offre addirittura un milione di dollari a chi troverà la risposta a questa domanda. Da quando è stato bandito, nel 2000, il premio non è stato ancora assegnato.

Nel sondaggio più recente sulla validità di $P = NP$, secondo l'83 per cento degli informatici P non è uguale a NP: ritengono cioè che non esistano algoritmi efficienti per risolvere i problemi in NP, né mai potranno esistere. Un altro sondaggio tra gli informatici è servito a decidere come chiamare i problemi difficili da risolvere quanto quelli in NP, che appartengano o meno a questa classe. Il nome scelto alla fine è stato il prosaico NP-difficili («NP-hard»). Ma il sondaggio ha mostrato un piacevole senso dell'umorismo: tra le proposte alternative ci sono state «NP-impractical» (NP-scomodi), «NP-tricky» (NP-complicati) e «NP-hard-ass» (NP-tosti).

Circuito di caramelle.

Per dimostrare che Candy Crush appartiene a una classe di problemi nota come NP, lo si può trasformare nell'equivalente di un problema logico che appartiene alla stessa classe, allestendo un modello di circuito elettrico composto da caramelle. Il primo componente necessario è una base con una disposizione neutra di caramelle (*in alto, colonna di sinistra*). Un cavo è composto di grappoli viola (*al centro, colonna di sinistra*). Un interruttore permette di decidere quali cavi usare (*in basso, colonna di sinistra*). Il segnale percorre il cavo una volta che viene avviato da un input di partenza che crea una fila di tre caramelle che, come sempre nel gioco, vengono cancellate (*in alto, colonna di destra*). Il gruppo successivo scende (nel verso della freccia contrassegnata «direzione del flusso»), creando a sua volta una fila di tre (*al centro, colonna di destra*). Quando questa fila viene cancellata, una caramella cade nella casella per l'output, completando così la trasmissione (*in basso, colonna di destra*).



L'idea della riduzione tra problemi è centrale per la questione $P = NP$. Se trovassimo un algoritmo che possa risolvere in modo efficiente certi specifici problemi in NP, potremmo anche risolvere in modo efficiente tutti gli altri problemi in NP. Il mondo sarebbe un posto diverso, se succedesse davvero. Dal lato positivo, vivremmo con un migliore gestione del tempo, con trasporti, voli e turni gestiti in modo ottimale, il che ci farebbe risparmiare (e vincere sempre a Candy Crush). D'altronde in altri ambiti, come la violazione di codici segreti, contiamo sul fatto che siano computazionalmente impegnativi, in modo che le nostre password e il nostro conto in banca siano al sicuro. La complessità computazionale può essere una benedizione e una iattura allo stesso tempo. Vogliamo che sia garantita la difficoltà di svolgere i calcoli con

cui gli hacker potrebbero decifrare i messaggi, ma vogliamo anche poter cifrare facilmente gli stessi messaggi.

Questo esempio vi ricorda forse la definizione di NP: problemi in cui è facile verificare la soluzione ma è difficile trovarla. La crittografia si basa proprio sul fatto di porre barriere computazionali sulla strada dei malintenzionati. Se queste barriere scomparsissero, il nostro mondo passerebbe seri guai.

Dietro al gioco

Per mostrare che Candy Crush è un problema matematicamente arduo, possiamo ridurci a esso da qualsiasi problema in NP. Per non complicarci troppo la vita, io e i miei colleghi siamo partiti dall'antesignano di tutti i problemi in NP, quello di trovare una

soluzione a una formula logica. È detto problema della soddisfattibilità. Se avete mai affrontato un rompicapo logico, avete risolto un problema del genere: bisogna decidere quali proposizioni devono essere vere e quali false per soddisfare un insieme di formule logiche. L'inglese vive nella casa rossa. Il cane è dello spagnolo. Il norvegese vive accanto alla casa azzurra. La proposizione che lo spagnolo è proprietario della zebra deve essere vera o falsa?

Per ridurre un rompicapo logico a un problema di Candy Crush sfruttiamo lo stretto legame tra la logica e i circuiti elettrici. Qualsiasi formula logica si può rappresentare in modo semplice con un circuito elettrico. Dopotutto i computer non sono altro che un ammasso di porte logiche – AND, OR e NOT – collegate da cavi. Quindi basta far vedere che all'interno di una partita di Candy Crush possiamo costruire un circuito elettrico.

Prima di tutto ci serve una base su cui costruirlo. La base deve essere una disposizione neutra di caramelle che non interagiscono tra loro (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Questa scacchiera di caramelle somiglia un po' a un semaforo: nelle colonne pari alterniamo «fagioli» rossi e gocce al limone gialle, mentre in quelle dispari alterniamo pastiglie arancioni e gomme verdi. In questo modo, anche se una colonna scorre non si forma mai una catena di tre caramelle identiche.

In questa struttura inseriamo i componenti elettrici, che sono formati dai «grappoli» viola; li inseriamo in modo da spostare le altre caramelle, non da sovrapporvisi. Questi grappoli formano i cavi che trasmettono i segnali nel circuito, ed è anche possibile collegare più cavi per creare configurazioni più complesse quando serve (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Se disponiamo un grappolo viola come segnale in ingresso del cavo a sinistra, creiamo una catena di tre grappoli viola. Questa catena scompare, come da regola base del gioco, e fa scendere le caramelle nelle colonne corrispondenti, propagando il segnale lungo il cavo. Alla fine, come *output*, sulla destra, comparirà un grappolo viola. È così che si trasmette un segnale nell'area di gioco.

Ci servono anche interruttori che possano essere usati dall'utente per decidere quali cavi sono attivi. Questi interruttori rappresentano la scelta se una proposizione della nostra formula booleana è posta come vera o falsa. L'utente può spostare in alto o in basso il grappolo viola centrale: questo spostamento attiva un segnale verso destra o verso sinistra.

Infine possiamo costruire porte logiche come AND, OR e NOT con altri gruppi di grappoli viola, a partire da questi componenti fondamentali. A questo punto dobbiamo solo collegare a queste porte logiche gli opportuni interruttori con cavi lunghi a sufficienza e avremo un circuito elettrico che simula la nostra porta logica. Il circuito elettrico ha un bit di output che rappresenta il valore di verità della formula.

Rappresentazione mediante rompicapi

Espresso in questi termini, giocare a Candy Crush consiste nel decidere quali interruttori commutare in modo che le porte logiche si attivino nel modo appropriato e il bit di output abbia il valore «vero». Riusciamo così a ridurre il problema di soddisfare una formula logica a quello di risolvere un problema di Candy Crush. E dato che soddisfare una formula logica è un problema difficile, lo deve essere anche risolvere un livello di Candy Crush.

Si può dimostrare anche l'inverso: possiamo cioè ridurre un problema di Candy Crush alla soddisfattibilità di una formula. Dob-

biamo solo scrivere una sequenza di formule che descrivano un livello di Candy Crush. In sostanza, questa descrizione logica di Candy Crush già si trova nel programma. Quindi Candy Crush non è più difficile di ogni altro problema in NP, e giocarci è difficile quanto risolvere altri problemi in NP. Se avessimo un modo efficiente per giocare a Candy Crush, avremmo un modo dimostrabile per instradare con efficienza i camion, fissare i turni del personale o preparare gli orari delle lezioni. Viceversa, se sapessimo instradare camion, organizzare il personale o programmare lezioni con efficienza, avremmo un modo efficiente per giocare a Candy Crush. È la potenza del metodo della riduzione tra problemi.

La prossima volta che non riuscite a superare un livello di Candy Crush nel numero prescritto di mosse, vi potete consolare sapendo che è un problema matematicamente arduo da risolvere. Anzi, questa caratteristica può essere in parte ciò che rende così difficile smettere di giocare; se fosse facile come giocare a filetto, per esempio, non sarebbe altrettanto avvincente.

Alla base di tutto c'è l'idea elegante e basilare di riduzione tra problemi, che ha permesso agli informatici di semplificare il labirinto dei diversi problemi computazionali in un numero inferiore di classi fondamentali come P e NP, che formano nel complesso il

cosiddetto zoo. Oggi nello zoo ci sono 500 classi di problemi, comprese quelle con nomi esotici come $\Delta_2 P$, LogFew, NEEE e P-close. (In caso vi fosse sfuggito, agli informatici piacciono gli acronimi.)

Nell'improbabile caso che si dimostri che P coincide con NP, il numero di classi nello zoo della complessità calerebbe molto. Numerose classi che riteniamo distinte verrebbero a coincidere. Se invece P non è uguale a NP, come ritiene la maggioranza degli informatici, lo zoo contiene molte classi distinte, anzi continua a crescere di dimensioni. Gli zoologi della complessità hanno introdotto anche nuove classi per descrivere la complessità dei problemi risolti con computer quantistici.

Il concetto della riduzione tra problemi offre una prospettiva affascinante per gli appassionati di Candy Crush. Sarà forse possibile mettere a buon uso i milioni di ore che le persone trascorrono risolvendo quadri di questo gioco? Sfruttando l'idea di riduzione tra problemi potremmo nascondere alcuni problemi computazionali di utilità concreta in questi rompicapi. Già ci sono alcuni problemi che traggono beneficio da questo tipo di interazione: ogni volta che dimostrate a un sito web che siete una persona e non un *bot* risolvendo un CAPTCHA (una di quelle onnipresenti immagini distorte di una parola o di un numero che dobbiamo inserire), la risposta aiuta Google a digitalizzare vecchi libri e articoli. Forse potremmo trovare un buon uso simile anche per Candy Crush.

I nostri studi su Candy Crush ci fanno provare un grande rispetto per questo passatempo apparentemente innocuo. In realtà ci aiuta ad approfondire uno dei più importanti problemi aperti della matematica, le cui implicazioni si estendono a molte applicazioni pratiche, come gli algoritmi di cifratura usati per tenere al sicuro i conti bancari. Potete provare a spiegare questa ampia visione delle cose al vostro capo, la prossima volta che vi sorprende a fare «ancora un livello e poi basta».

PER APPROFONDIRE

Candy Crush is NP-hard. Walsh T, disponibile on line su arXiv: <http://arxiv.org/abs/1403.1911>.

Macchine dell'infinito. Pavlus J., in «Le Scienze», n. 531, novembre 2012.

La scienza del sudoku. Delahaye J.-P., in «Le Scienze», n. 456, agosto 2006.

AMBIENTE

Alla ricerca della plastica

scomparsa

Secondo lo studio più completo sull'inquinamento da plastica dei mari mancano all'appello grandi quantità di rifiuti. E le ipotesi su dove sia finita tutta questa plastica aprono nuovi, inquietanti scenari

di Alfonso Lucifredi

Alfonso Lucifredi è un naturalista e giornalista scientifico. È autore di mostre, conferenze ed eventi di divulgazione su ambiente, società, futuro del pianeta.



L’ aspetto che più di ogni altro rende affascinante l’oceano è la sua vastità. Navigare per giorni e giorni attraversando piatti, invariati paesaggi tinti d’azzurro può fornirci soltanto una vaga idea della sua sterminata estensione, dandoci l’impressione di qualcosa di immutabile di fronte a ogni tipo di evento esterno. Chissà quali saranno stati i pensieri di Charles Moore quando, di ritorno da una regata nel cuore dell’Oceano Pacifico, incappò casualmente in un’immensa concentrazione di rifiuti di plastica galleggiante, scoprendo così il Great Pacific Garbage Patch. Forse l’uomo era davvero in grado di danneggiare la placida vastità dell’oceano?

Cifre difficili persino da immaginare: 5250 miliardi di frammenti galleggianti, per un peso di circa 268.940 tonnellate. Sono il risultato delle stime fornite dallo studio realizzato dai ricercatori del 5 Gyres Institute sull’inquinamento da plastica degli oceani. Per la prima volta sono stati analizzati e confrontati i dati provenienti da ogni mare del globo: a generare questi risultati sono state 24 spedizioni marittime che hanno toccato 1571 differenti *location*, studiate con campionamenti o per osservazione diretta in più di sei anni di ricerche (2007-2013). Le aree toccate sono state i cinque grandi vortici (*gyres*) nel cuore degli oceani, le coste australiane, il Golfo del Bengala e il Mar Mediterraneo.

Pubblicato nel dicembre 2014 su «PLoS One», lo studio comparato confronta dati reali con stime a tavolino sulla distribuzione dei frammenti di plastica, classificati in base alla dimensione e al peso. I detriti sono stati suddivisi in quattro classi di dimensione: le microplastiche piccole (da 0,33 a 1 millimetro), le microplastiche grandi (da 1,01 a 4,75), le mesoplastiche (da 4,76 a 200), e le macroplastiche (superiori ai 200 millimetri). Un modello preventivo sulla loro distribuzione è stato applicato separatamente per le quattro classi. Dall’osservazione diretta, su un totale di 680 misurazioni con le reti da campionamento si è ottenuto un 70 per cento di risultati compresi in una forbice variabile tra i 1000 e i 100.000 frammenti per chilometro quadrato, mentre il 16 per cento ha fornito densità di particelle anche superiori, fino a un mas-

simo di 890.000 frammenti per chilometro quadrato, trovati in un campionamento nel Mediterraneo. Il 92,3 per cento della totalità dei campionamenti conteneva almeno un frammento di plastica al suo interno. Le 891 osservazioni dirette (senza campionamenti delle acque con reti da plancton) hanno rivelato che gli oggetti in polistirene espanso costituiscono la maggior parte delle microplastiche, mentre i galleggianti da pesca alla deriva costituiscono più della metà del peso totale delle macroplastiche.

Nonostante la maggiore produzione industriale di plastiche nell’emisfero settentrionale e un conseguente maggior abbandono in mare, a quanto pare l’azione delle correnti ha inaspettatamente ridistribuito con una certa omogeneità i frammenti a ogni latitudine, compresi i mari artici.

La sorpresa principale fornita dallo studio è stata la presenza relativamente bassa sulla superficie dell’acqua delle microplastiche, ossia di tutti frammenti di dimensioni inferiori ai 4,75 millimetri, che potrebbe indicare l’esistenza di meccanismi di rimozione: potrebbe trattarsi di affondamento o spiaggiamento, ma l’ipotesi peggiore prevede l’ingresso dei microframmenti nelle catene trofiche degli organismi marini, con ripercussioni sugli interi ecosistemi e sull’industria della pesca non ancora quantificabili, ma sicuramente drammatiche.

Nel luglio 2014 si era già avanzata questa ipotesi, prendendo spunto dai risultati della spedizione Malaspina, guidata dal Consi-

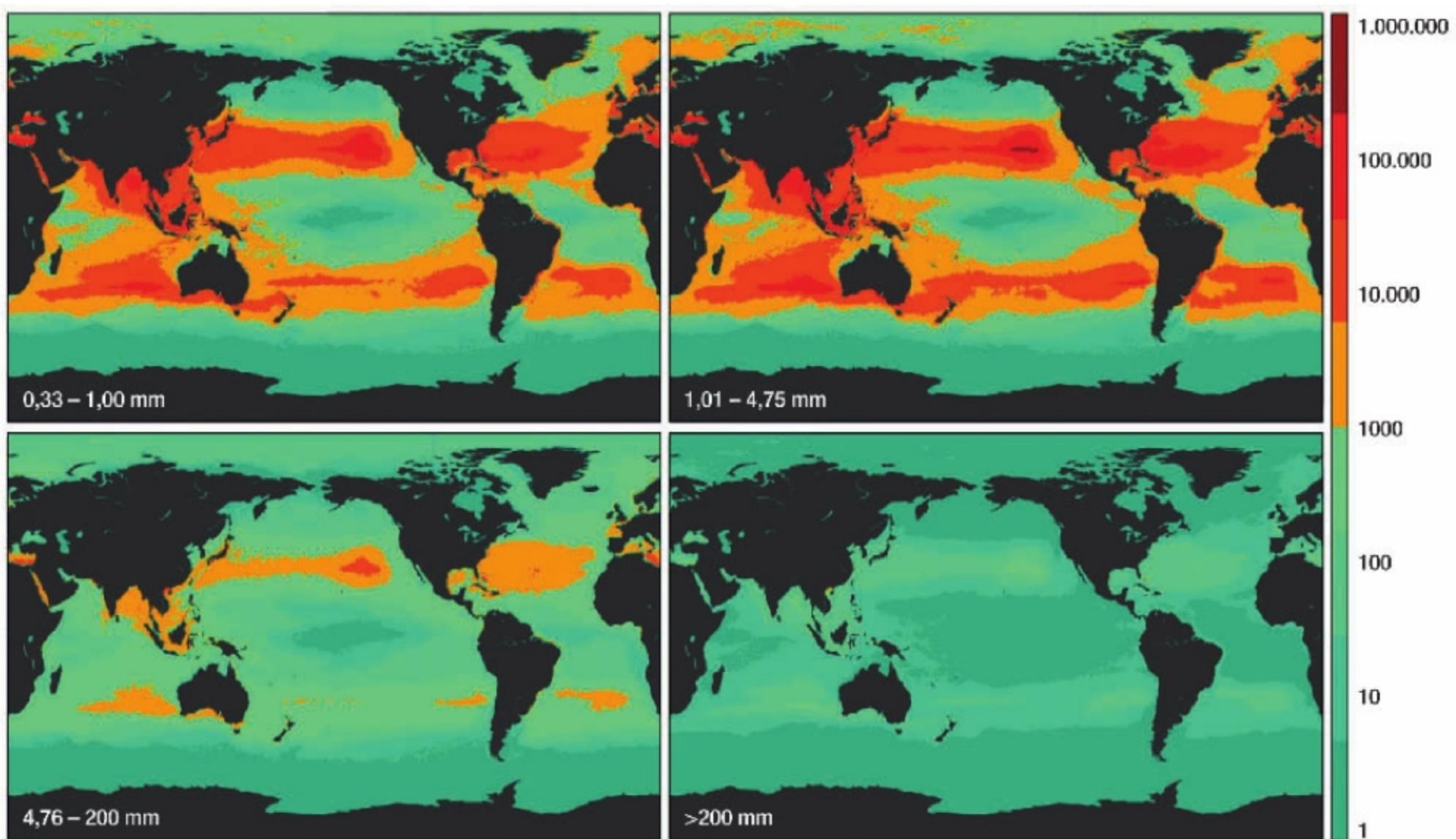
IN BREVÉ

Un recente rapporto sulla plastica che inquina gli oceani, realizzato dai ricercatori del 5 Gyres Institute, ha quantificato in oltre 5 miliardi i frammenti di plastica che galleggiano sulla superficie dei mari del globo.

Classificati in base a dimensione e peso in quattro grandi classi, i detriti sono risultati distribuiti in modo abbastanza omogeneo a ogni latitudine, probabilmente grazie all’azione delle correnti.

La sorpresa principale è stata però la relativa scarsità dei frammenti più piccoli, che potrebbe indicarne l’ingresso nella catena alimentare degli organismi marini, con effetti drammatici sugli ecosistemi.

Diversi progetti sono già in corso per affrontare il problema, ma i risultati più significativi potrebbero venire dai programmi destinati a sensibilizzare il grande pubblico per ridurre l’uso della plastica.



Il problema e la sua estensione. Le mappe della densità globale di frammenti di plastica in base a intervalli di dimensione, espressa come numero di pezzi per chilometro quadrato. Sotto, rifiuti di plastica pescati nell'area settentrionale dell'Oceano Atlantico.



glio nazionale delle ricerche di Spagna, che nel 2010 aveva navigato in lungo e in largo i mari del globo alla ricerca degli accumuli di detriti galleggianti. Anche in questo caso i risultati ottenuti provenivano da un'imponente mole di dati raccolti: 3070 campionamenti provenienti da 141 differenti siti di raccolta, nel corso di cinque differenti navigazioni oceaniche realizzate tra dicembre 2010 e luglio 2011. Il relativo studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», contenente l'elaborazione dei dati raccolti, aveva già allora sottolineato numeri discordanti tra le quantità di microparticelle di plastica galleggianti stimate a tavolino e la loro reale presenza nelle acque marine. A fronte di un valore osservato compreso tra 7000 e 35.000 tonnellate, quindi con ampiissimi margini di variabilità e pur valutando possibili imprecisioni dovute ai più svariati fattori, una stima conservativa fatta a tavolino di tutta la plastica rilasciata negli oceani a partire dagli anni settanta del Novecento (e dunque vent'anni dopo l'ingresso della plastica nei mercati mondiali) dava un risultato dell'ordine dei milioni di tonnellate. Una cifra estremamente superiore a quanto realmente riscontrato, con un rapporto di cento a uno tra il valore atteso e quello reale. Dov'era finita tutta la plastica mancante?

Gli studi più recenti

Le probabili cause di scomparsa delle microparticelle sono sostanzialmente quattro: la deposizione selettiva sulle coste, la frammentazione in frazioni ancora più piccole e impossibili da recuperare con gli strumenti di campionamento (la maglia delle reti da plancton, generalmente usate per queste misurazioni, è di 0,33 millimetri), il cosiddetto *biofouling*, ossia l'accumulo di organismi marini sulla loro superficie che ne potrebbe impedire il riconoscimento o anche portare a un loro affondamento, e infine l'ingresso nelle catene alimentari dell'ambiente oceanico.

È ancora molto difficile stabilire quanto questi fattori influisca-

La formazione delle «isole» di plastica

A partire dagli anni cinquanta del Novecento, con l'ingresso della plastica nei mercati mondiali, è iniziata la formazione del Garbage Patch, che da allora è andata avanti ininterrottamente seguendo le stesse modalità, ma a un ritmo sempre più elevato, dato il costante aumento della fabbricazione industriale (288 milioni di tonnellate prodotte nel solo 2012). La plastica raggiunge il mare, segue le correnti principali e, anche se non si biodegrada subito, si fotodegrada per azione della luce solare, riducendosi in frammenti sempre più piccoli, non immediatamente riconoscibili a occhio nudo (ecco perché il termine «isole» va preso con la dovuta cautela).

L'azione costante delle correnti marine conduce questi pezzetti di plastica, chiamati «lacrime di sirena» (*mermaid tears*), verso zone di convergenza nel cuore degli oceani, dove si accumulano in grandi densità. Cinque grandi vortici nei mari del mondo sembrano essere il luogo dove al momento si concentra gran parte dei rifiuti di plastica: il Turtle Gyre nel nord Pacifico (il celebre Great Pacific Garbage Patch scoperto nel 1997 da Charles Moore, il fondatore del 5 Gyres Institute), l'Heyerdahl Gyre nel sud Pacifico, il Majid Gyre nell'Oceano Indiano, il Columbus Gyre e il Navigator Gyre, rispettivamente nel nord e sud Atlantico.

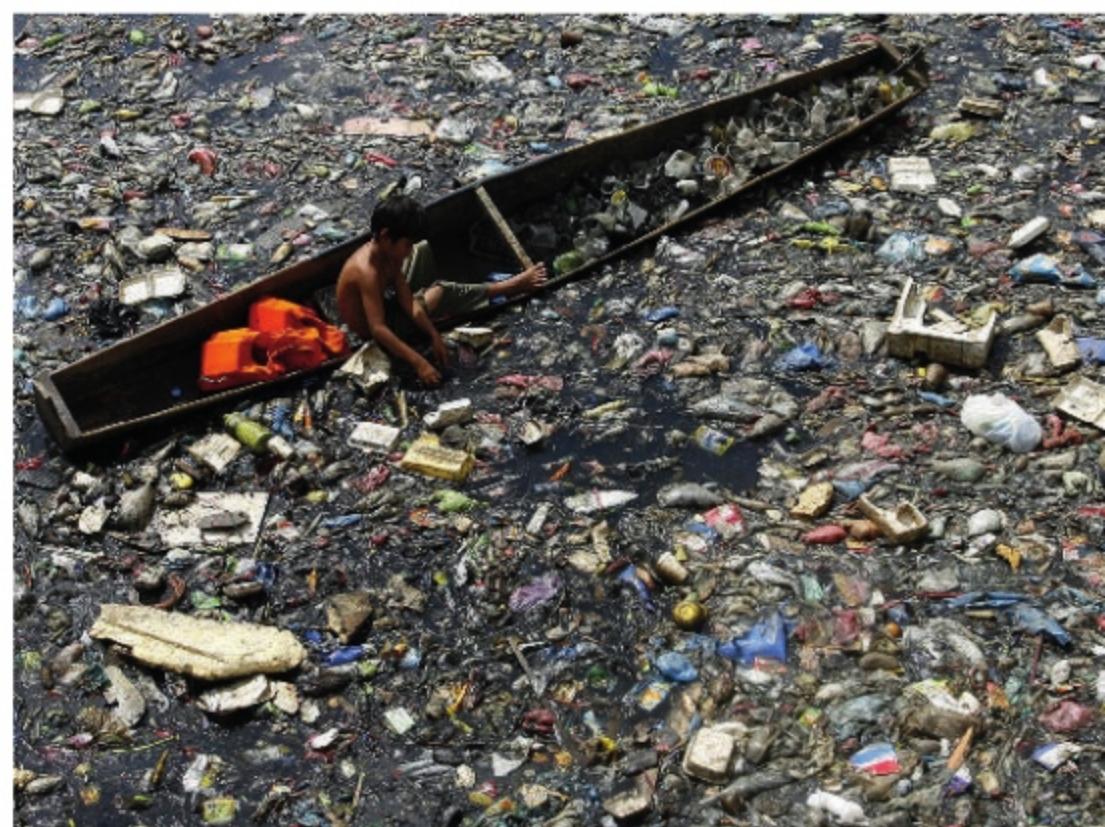
no in maniera significativa sulla plastica galleggiante, soprattutto perché gli studi in questo campo sono ancora relativamente giovani: l'esistenza della «grande chiazza di rifiuti» del Pacifico venne ipotizzata solo nel 1988 in un documento della National Geographic and Oceanic Administration (NOAA) degli Stati Uniti, la sua prima osservazione diretta venne compiuta da Charles Moore nel 1997, mentre i primi studi approfonditi sul fenomeno risalgono a poco più di dieci anni fa. Tra i precursori di queste ricerche c'è il biologo marino Richard C. Thompson, che in uno studio del 2004 ha inquadrato per la prima volta il problema, sottolineando come gran parte dei rifiuti galleggianti sia costituita da microplastiche. A questo termine è stata poi assegnata una definizione precisa dalla stessa NOAA, facendo ricadere nella categoria soltanto i frammenti di dimensioni inferiori ai 5 millimetri (nello studio del 5 Gyres Institute è stato scelto il valore di 4,75 millimetri in quanto misura standard delle maglie dei setacci usati per una prima classificazione).

L'articolo dei ricercatori del 5 Gyres ha sottolineato ancora una volta l'effettiva presenza di quelle grandi «isole» di plastica, ossia zone ad alta densità di microplastiche, nel cuore degli oceani. La conferma della loro esistenza è giunta anche dalla spedizione Mala spina, che ha portato alla creazione di una prima mappa mondiale dei rifiuti marini galleggianti.

Al momento attuale questi sono i due studi più approfonditi mai fatti sull'argomento, e nonostante la grande mole di dati raccolti rimangono comunque tantissimi interrogativi ancora aperti, non solo sulla scomparsa delle microplastiche, ma anche sulle rotte migratorie compiute dai detriti e sui meccanismi di interazione con gli ambienti marini.

Sempre nel 2014, l'UNEP (United Nations Environment Programme) ha pubblicato lo studio *Valuing plastic – The business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry*, che parla chiaro: nell'arco di dodici mesi, dai 10 ai 20 milioni di tonnellate di plastica raggiungono gli oceani causando un danno stimato in 13 miliardi di dollari all'anno agli ecosistemi marini. Questi calcoli, basati principalmente su stime conservative, includono soltanto alcuni aspetti del problema, che in futuro potrebbe colpire l'uomo e l'ambiente marino ancora più duramente.

È ancora più recente una stima, effettuata da un team guidato da Jenna R. Jambeck, ingegnere ambientale all'Università della Georgia, sulla quantità effettiva di materie plastiche che ogni anno arrivano in mare. Lo studio, presentato al convegno annuale della American Association for the Advancement of Science (AAAS) e pubblicato su «Science» il 13 febbraio 2015, parla di cifre



Un bambino rovista tra i rifiuti di plastica che galleggiano in un fiume a Mandaluyong, a est di Manila, in cerca di oggetti da vendere.

imponenti: nel 2010 sono stati generati 275 milioni di tonnellate di rifiuti plastici dalle 192 nazioni che si affacciano sul mare. Di questi, una quantità che potrebbe variare tra i 4,8 e i 12,7 milioni di tonnellate ha raggiunto le acque degli oceani. Tra gli elementi che determinano quali nazioni contribuiscono maggiormente a questo apporto ci sono sia i sistemi di gestione dei rifiuti sia la dimensione delle popolazioni. Non stupisce infatti la presenza di molte nazioni asiatiche in testa a questa classifica negativa, con Cina, Indonesia, Filippine e Vietnam a occupare le prime quattro posizioni.

Lo studio si chiude con una previsione inquietante: i rifiuti plasticci che raggiungono l'oceano aumenteranno di un ordine di grandezza entro il 2025, a meno che nel frattempo non vengano realizzati sensibili miglioramenti alle infrastrutture destinate alla loro gestione.

Le conseguenze ecologiche

Nicolò Carnimeo, autore di *Come è profondo il mare*, professore all'Università di Bari e navigatore di esperienza, ne ha parlato diffusamente durante la sua conferenza al Festival della Scienza di Genova, edizione 2014: una volta arrivata in mare, la plastica diventa parte integrante dell'ambiente. Le immagini da lui raccolte

Uno Stato di plastica. Questa installazione dell'artista italiana Maria Cristina Finucci è stata esposta nella sede dell'UNESCO a Parigi nel 2013. In quella occasione l'agenzia delle Nazioni Unite ha dichiarato in modo simbolico il riconoscimento del Garbage Patch State, ovvero una nazione formata dalla plastica che inquina i mari, per sensibilizzare i paesi, quelli veri, ad affrontare il problema ormai urgente.



negli anni ne sono la dimostrazione: pesci e uccelli ritrovati con lo stomaco pieno di tappi di PET e di accendini, alghe che hanno colonizzato cassette della frutta e coperchi di pattumiere, intere spiagge che hanno cambiato il loro volto a causa del continuo accumulo di rifiuti portati dalle onde.

I frammenti microscopici di plastica che fluttuano negli oceani causano modifiche all'ecosistema marino su più livelli. Vengono aspirati dagli animali filtratori, come le ascidie, le salpe, i denti di cane o i muscoli, spesso incistandosi nei loro tessuti. I microfrazioni vengono mangiati in gran quantità anche dai pesci della zona mesopelagica (dai 200 ai 1000 metri di profondità circa), in particolare i piccoli pesci lanterna (Myctophidae), tipici dei vortici oceanici e principale anello di congiunzione tra il plancton e gli altri vertebrati marini. Pesce grande mangia pesce piccolo: tra i loro predatori ci sono anche il pesce spada e il tonno, e di conseguenza il contenuto del loro stomaco passa ai tessuti di animali che sono a loro volta mangiati dall'uomo.

Anche gli additivi industriali della plastica si possono accumulare nel tratto digestivo di molti animali, e l'ingresso nella catena alimentare di questi composti può portare a concentrazioni sempre più grandi nei tessuti degli organismi marini, passando dal basso verso l'alto nella catena alimentare (biomagnificazione).

Altri animali marini ingeriscono inoltre i frammenti di plastica più grossi, che li possono avvelenare o causare soffocamento o blocchi intestinali mortali. In totale si stima che più di un milione

di uccelli e 100.000 mammiferi marini muoiano ogni anno a causa dell'ingestione di plastica o perché intrappolati nei rifiuti.

Midway è un piccolo atollo dell'arcipelago delle Hawaii, nell'Oceano Pacifico, lambito dalla parte orientale del North Pacific Garbage Patch. Considerato riserva naturale, ha un ruolo ecologico di grande importanza, perché ospita una colonia di albatros che ogni anno dà alla luce 500.000 pulcini, 200.000 dei quali muoiono a causa dell'ingestione di plastica con cui i genitori li nutrono, scambiandola per cibo. In queste aree gli effetti del Garbage Patch sugli animali sono drammatici: in un terzo degli uccelli marini trovati morti nel nord Pacifico sono stati trovati pezzi di plastica nello stomaco. Mesi fa ha fatto scalpore la crudezza di un video che circolava in rete, realizzato dal fotografo e videomaker Chris Jordan. Intitolato *Midway* (<http://www.midwayfilm.com>), si tratta del trailer di un documentario, legato al *crowdfunding* e ancora in fase progettuale, dedicato alla moria di nidiacei, in particolare albatros, a causa dell'inquinamento. Le durissime immagini di uccelli ancora agonizzanti e l'incredibile quantità di tappi e altri residui di plastica all'interno dello stomaco dei cadaveri di tantissimi pulli trovati morti nel nido hanno fatto il giro del mondo, generando grande scalpore e milioni di visualizzazioni.

Persino un gruppo di insetti ha subito gli effetti ecologici del Garbage Patch. Si tratta degli insetti pattinatori, o gerridi, gli unici nella loro classe a vivere in mare aperto. Sono Rincoti Eterotteri della famiglia Gerridae, appartenenti al genere *Halobates*, e sfrut-

I mille volti della plastica

Nelle migliaia e migliaia di tonnellate di rifiuti che ogni anno arrivano nei mari del mondo sono presenti svariate tipologie di plastica, ciascuna con diversa origine e ciclo vitale. Tra i polimeri termoplastici uno dei più usati è il polietilene, che si distingue in due tipi, ad alta densità (HDPE) e a bassa densità (LDPE): il primo regge meglio alle sollecitazioni e si usa generalmente nei contenitori e nelle tubature per acqua e gas, mentre il secondo è più sensibile al calore ma resiste meglio agli agenti chimici, e per questo motivo è usato per la realizzazione di sacchetti, imballaggi e pellicole per alimenti.

Poi c'è il polistirene, usato per l'isolamento termico e acustico, per gli imballaggi e come stampo di fonderia. Il cloruro di polivinile o PVC è utilizzato tra l'altro per la realizzazione di tubature, elementi di edilizia, cavi elettrici. Il polipropilene, PP, è un componente di moltissimi oggetti di uso comune, come tappi ed etichette delle bottiglie di plastica ma anche cruscotti delle automobili. Il PET (polietilene tereftalato) è la plastica con cui vengono realizzate le classiche bottiglie per l'acqua, ma è anche utilizzato nella realizzazione di altri contenitori di uso alimentare, pellicole, etichette e tubature. Data la sua incredibile resistenza all'usura, è importante ai fini degli studi sull'inquinamento anche il nylon, in uso nell'industria tessile da decenni e più recentemente introdotto in altri campi, tra cui l'edilizia.

tano le isole di plastica come superficie per depositare le uova. Poiché la superficie dei rifiuti in mare è molti estesa, questi insetti marini si stanno riproducendo molto di più che in passato. Gli insetti pattinatori si nutrono di uova di pesce e plancton, lo stesso cibo che mangiano anche i pesci e le tartarughe, che di conseguenza non hanno più cibo a sufficienza.

Le conseguenze sull'uomo

Oltre agli enormi danni economici portati al turismo costiero (stime conservative valutano in 3 miliardi di dollari all'anno il costo della pulizia delle spiagge), altri problemi potrebbero essere causati all'uomo dal Garbage Patch, soprattutto per quanto riguarda le abitudini alimentari delle popolazioni costiere. Il bioaccumulo nei tessuti dei pesci più grandi potrebbe comportare una costante e preoccupante assunzione di microplastiche da parte dei consumatori abituali di pesce, con pericolose ripercussioni sanitarie. Oltre al pesce, infatti, è bene non dimenticare i tanti organismi filtratori che raggiungono le nostre tavole, in particolare molte specie di molluschi.

Tra il 2010 e il 2012 l'Università di Gand ha monitorato la presenza di microplastiche nei tessuti dei mitili raccolti lungo le coste del Belgio: sebbene le concentrazioni nel corpo dei molluschi non fossero così elevate da poter creare problemi sanitari, dai campionamenti su sei diverse stazioni di controllo è stata riscontrata una media di 1-2 microframmenti per grammo di carne di mollusco, il che significa che con una porzione media di mitili di 300 grammi vengono ingerite dalle 300 alle 600 frazioni di plastica, per un peso complessivo di circa un microgrammo.

Piccole quantità, certo, ma bisogna tener presente un aspetto importante: i frammenti di plastica hanno la proprietà di raccogliere e accumulare alcune sostanze tossiche per l'uomo, come i policlorobifenili, cancerogeni per gli animali di laboratorio e presumibilmente anche per l'uomo in quanto collegati a un aumento dell'incidenza di melanomi, cancro al fegato, alla cistifellea e al cervello. Hideshige Takada, uno scienziato giapponese impegnato nello studio delle particelle del Western Pacific Garbage Patch, ha riscontrato che sono un milione di volte più tossici dell'acqua in cui galleggiano, a causa di questa loro capacità di accumulo di sostanze nocive. E, nella maggior parte dei casi, ci riferiamo a materiali che possono rilasciare composti dannosi già all'origine: alcuni monomeri sono noti per essere intrinsecamente tossici, come il cloruro di vinile da cui si ricava il cloruro di polivinile (PVC), lo stirene da cui si crea il polistirene, e il bisfenolo-A (BPA), componente fondamentale dei policarbonati.

Molti additivi delle principali plastiche in commercio sono anche considerati «distruttori endocrini», in quanto possono alterare le funzionalità del sistema endocrino e in particolare degli ormoni sessuali, causando un raggiungimento anticipato della pubertà nelle femmine e una diminuita spermatogenesi nei maschi.

Che cosa si può fare e che cosa si sta facendo

I progetti in corso per mitigare i danni causati dalla plastica negli oceani sono tanti, eppure è difficile fornire un quadro organico della situazione attuale, soprattutto perché molte delle istituzioni impegnate nella ricerca sono fondazioni private, spesso basate sulle donazioni volontarie.

In particolare, lo scorso anno la raccolta di fondi legata al progetto The Ocean Cleanup, che fa capo all'omonima fondazione, ha raggiunto l'obiettivo di due milioni di dollari prefissati per avviare il suo piano di lavoro. Ora la realizzabilità è al vaglio di cir-

ca un centinaio di persone tra progettisti, ingegneri e ricercatori di diverse discipline. Di certo si tratta di un successo per il suo ideatore, il giovanissimo olandese Boyan Slat, che aveva presentato The Ocean Cleanup al TEDxDelft nel 2012, e che nello stesso anno aveva vinto il premio Best Technical Design all'Università di Delft prima di dover fronteggiare una lunga serie di critiche al progetto, ritenuto da alcuni inefficace ad affrontare un problema di questa portata. Per il momento, invece, il primo round l'ha vinto Slat.

Il suo sistema prevede piattaforme galleggianti autosufficienti, alimentate da moto ondoso, vento e luce solare, che sfruttano le correnti marine per raccogliere i detriti. Il sistema di raccolta è costituito da aste al posto delle classiche reti, per permettere agli organismi acquatici di non essere catturati. C'è da notare inoltre che il sistema è, almeno sulla carta, sostenibile dal punto di vista finanziario: la plastica raccolta dai cinque grandi vortici degli oceani potrebbe essere rivenduta, chiudendo in attivo il bilancio di tutta l'impresa e tramutando un potenziale disastro ecologico in un business da miliardi di dollari. Utopia? Staremo a vedere.

In prima linea nello studio del Garbage Patch c'è poi The Algalita Marine Research Institute (AMRI), un'autorità riconosciuta nello studio di detriti marini di plastica nel Pacifico settentrionale; fondato da Charles Moore, è un'organizzazione no-profit di ricerca che si dedica alla tutela e al miglioramento dell'ambiente marino attraverso l'istruzione e la ricerca sulle conseguenze dell'inquinamento da plastica. Le sue attività includono ricerche sul campo sulla distribuzione e gli spostamenti dei rifiuti plasticci in mare, sui loro effetti nocivi sull'ambiente, sulle catene trofiche e l'impatto sulla salute umana, in modo da fornire risultati autorevoli e verificati a scienziati, studenti, agenzie governative e al settore privato.



Una tartaruga marina può scambiare un sacchetto di plastica per una delle meduse di cui si nutre abitualmente.

Da non dimenticare ovviamente il già citato 5 Gyres Institute di Charles Moore, progetto nato da un partenariato tra Algalita e Pangea Exploration: per capire l'impatto dell'inquinamento da plastica vengono studiate le cinque spirali subtropicali con spedizioni scientifiche che coinvolgono scienziati, giornalisti e volontari, invitati di volta in volta a unirsi agli equipaggi ufficiali. Tutti i campioni raccolti sono analizzati da Algalita. Vengono usate le *manta trawl*, particolari reti studiate appositamente per raccogliere campioni di questo tipo, di peso e dimensioni ridotte, adatte quindi per essere trasportate in viaggi lunghi e impegnativi.

Nel Mediterraneo il punto di riferimento è *Expédition MED*, guidata da Bruno Dumontet, un collettivo composto da ambientalisti, scienziati, artisti e insegnanti riuniti in un'associazione che, oltre alla raccolta di dati scientifici in mare, mira a creare una rete di centri di ricerca e gruppi ambientalisti mobilitati per la tutela della biodiversità marina nel Mediterraneo e la lotta contro i rifiuti nel mare.

E poi ci sono tanti, tantissimi progetti volti alla sensibilizzazione del pubblico sul problema della plastica: Plastic Oceans, un documentario in via di lavorazione sull'inquinamento di plastica degli oceani, legato a una raccolta di fondi on line, il già citato documentario Midway, e il Plastiki, un catamarano di 18 metri interamente realizzato con bottiglie di plastica riciclate, il cui nome richiama chiaramente il Kon-Tiki di Thor Heyerdal. Realizzato da un team finanziato da David Mayer de Rothschild, il Plastiki sfrutta fonti di energia pulita come pale eoliche e pannelli solari e gira i mari del mondo per sensibilizzare il pubblico sul problema dell'inquinamento degli oceani.

Qualche effetto si sta vedendo: tanto si è fatto in questi ultimi anni per ridurre l'uso della plastica, con l'Italia in prima fila nel bandire le tradizionali buste della spesa.

È iniziata una massiccia commercializzazione delle bioplastiche e di altri materiali sostitutivi, biodegradabili e riutilizzabili, oltre alla nascita di negozi che vendono solo prodotti alla spina, seguendo la filosofia *zero packaging*. Tra i primi in assoluto, un grande successo è stato riscosso da Original Unverpackt, che ha aperto a Berlino a metà 2014 in seguito a una campagna di crowdfunding.

Ed è forse proprio la sensibilizzazione del pubblico il punto su cui bisogna lavorare più intensamente. Lo ha ben sottolineato Marcus Eriksen, cofondatore del 5 Gyres Institute, nel racconto *Gyres: The terrifying true story of the garbage that could kill the human race*, firmato da Bucky McMahon, in cui afferma che, molto semplicemente, non esistono soluzioni *dopo* il consumo: se anche si riuscisse a rimuovere tutta la plastica che oggi infesta gli oceani, l'unica risposta per il futuro sarebbe fermare l'inquinamento all'origine. ■

PER APPROFONDIRE

Plastic pollution in the World's Oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borrero J.C., Galgani F., Ryan P.G. e Reisser J., in «*PLoS One*», dicembre 2014.

Plastic Debris in the open ocean. Cózar A., Echevarría F., González-Gordillo J.I., Irigoien X., Úbeda B., Hernández-León S., Palma A.T., Navarro S., García-de-Lomas J., Ruiz A., Fernández-de-Puelles M.L. e Duarte C.M., in «*Proceedings of the National Academy of Sciences*», Vol. 111, n. 28, 15 luglio 2014.

Plastic waste inputs from land into the ocean. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R. e Lavender Law K., in «*Science*», Vol. 347, n. 6223, pp. 768-771, 13 febbraio 2015.

Come è profondo il mare. Carnimeo N., Chiarelettere, Milano, 2014.

L'oceano di plastica. La lotta per salvare il mare dai rifiuti della nostra civiltà. Moore C. e Phillips C., Feltrinelli, Milano, 2013.

CURARE LA DEPRESSIONE ALLA RADICE

**L'elettrostimolazione
cerebrale profonda
potrebbe alleviare
disturbi dell'umore
devastanti**

di Andres M. Lozano e Helen S. Mayberg

IN BREVE

Nell'arco della propria vita il 17 per cento circa della popolazione degli Stati Uniti soffre di quello che gli psichiatri chiamano «episodio depressivo maggiore».

Le cure disponibili, che vanno dai farmaci alla terapia elettroconvulsivante, garantiscono un sollievo limitato al 20 per cento o meno dei pazienti.

L'impianto nel cervello di elettrodi in profondità, oggi usato nel trattamento del morbo di Parkinson, è in fase di studio su pazienti per curare casi di depressione grave.

Sono stati scoperti circuiti cerebrali specifici connessi alla depressione e la loro conoscenza può dare indicazioni su dove collocare gli elettrodi.



Andres M. Lozano è professore al Dipartimento di chirurgia dell'Università di Toronto. È specializzato nella cura dei disordini del movimento e nella registrazione dell'attività cerebrale.



Helen S. Mayberg è docente di psichiatria, neurologia e radiologia alla Emory University. Le sue ricerche si concentrano sulla mappatura dei circuiti cerebrali coinvolti nella depressione.



«MI SENTO IMPROVVISAMENTE CALMA.»

La nostra paziente, una donna di mezza età che soffriva di depressione grave, pronunciò queste emozionanti parole in sala operatoria pochi secondi dopo che uno di noi (Lozano) aveva stimolato elettricamente un'area specifica in profondità nel suo cervello. L'intervento, avvenuto nel 2003 al Toronto Western Hospital, era stato effettuato in anestesia locale in modo che la paziente rimanesse cosciente e comunicasse con noi.

Con l'aumentare dell'intensità della corrente avevamo chiesto alla paziente se notava qualcosa di diverso. Con nostra sorpresa, ci disse che la stanza stava passando dal «bianco e nero ai colori», come se fosse stato premuto un interruttore in grado di risollevare istantaneamente il suo umore.

Questo test è stato il primo di molti studi che hanno portato allo sviluppo di un nuovo possibile approccio terapeutico contro la depressione, ovvero la stimolazione cerebrale profonda, una tecnica che viene già utilizzata per altri disturbi tra cui il morbo di Parkinson.

Nuove terapie contro la depressione soddisfarebbero un'esigenza molto forte. Nel corso della vita, circa il 17 per cento degli statunitensi soffre di uno o più attacchi di quelli che gli psichiatri chiamano «episodio depressivo maggiore» e circa l'otto per cento delle donne e il cinque per cento degli uomini ci convive ogni giorno. Non si tratta di semplici episodi di tristezza. Il disturbo depressivo maggiore, che si presenta in modo intermittente, è caratterizzato da una fase di intenso sconforto, senso di colpa, inutilità e perdita di interesse per le attività quotidiane. Può compromettere il pensiero, il sonno, l'appetito e il desiderio sessuale ed essere percepito come un dolore fisico. Winston Churchill, che combatté con questo disturbo, lo definì la sua «bestia nera.»

La depressione può uccidere. Si calcola che il 15 per cento dei pazienti con depressione maggiore muoia per suicidio. Il disturbo può inoltre aggravare problemi medici come le cardiopatie e il diabete, riducendo la speranza di vita di chi soffre di queste condizioni patologiche.

Le cure disponibili, che vanno dall'assistenza psicologica ai farmaci alla terapia eletroconvulsivante, sono efficaci in gran parte dei pazienti ma offrono un sollievo limitato o nessun sollievo al 10-20 per cento dei pazienti depressi. Proprio questo sottoinsieme di pazienti potrebbe essere candidato per la stimolazione cerebrale profonda man mano che la tecnica diventa consolidata.

Questa tecnologia non è stata ancora approvata per un uso di routine negli ospedali, tuttavia è stata testata su circa 200 pazienti in tutto il mondo. Consiste nella foratura del cranio e nell'impianto permanente di elettrodi all'interno del cervello e, per queste ragioni nessuno la considererà la prima scelta terapeutica. Se però

i prossimi test avessero successo, potrebbe offrire una speranza a persone che altrimenti potrebbero essere destinate a vivere in uno stato di angoscia perenne.

Una questione di circuiti

Il test del 2003 fu il risultato delle ricerche effettuate da uno di noi (Mayberg) per localizzare le regioni cerebrali coinvolte nella depressione. All'epoca i neuroscienziati avevano già stabilito che i sintomi della depressione e diversi altri disturbi cerebrali sono provocati da anomalie nel funzionamento di specifici circuiti neuronali. Nel morbo di Parkinson, tremori o rigidità sono causati dall'incepparsi dei circuiti che regolano il movimento. I circuiti coinvolti nella creazione di nuovi ricordi o nel recupero della memoria vanno in tilt nel caso dell'Alzheimer. Analogamente, all'inizio degli anni 2000 numerosi studi hanno dimostrato che al centro della depressione ci sono disturbi nel funzionamento dei circuiti che mediano il tono dell'umore.

Questi circuiti sono formati da collegamenti tra sottoinsiemi degli 86 miliardi di neuroni del cervello. Ciascuna cellula può stabilire fino un migliaio di collegamenti con altre cellule: alcune sono collegate al neurone vicino, altre invece percorrono grandi distanze attraverso il sistema nervoso centrale. Il collegamento tra una cellula e un'altra dipende da fattori genetici, esperienze in età precoce e stress. È probabile che il cattivo funzionamento dei circuiti legati alla depressione coinvolga diverse regioni cerebrali. Ma determinare la distribuzione di questa ragnatela di collegamenti rimane ancora una sfida per i neuroscienziati.

A metà degli anni novanta, Mayberg aveva iniziato a progettare una serie di esperimenti per identificare le aree del cervello coinvolte nella regolazione del tono dell'umore in soggetti in salute e in depressi.

In un primo esperimento, i soggetti sani dovevano rivivere mentalmente un'esperienza triste della loro vita. Una scansione cerebrale chiamata tomografia a emissione di positroni (PET) aveva mappato le aree in cui si verificavano cambiamenti marcati dell'attività quando il soggetto si sentiva demoralizzato. Una PET aveva trovato che i pazienti depressi, rispetto a quelli in salute, mostravano un maggiore flusso sanguigno – una misura dell'attività delle cellule cerebrali – in una particolare area in mezzo al cervello. Al contrario, le regioni coinvolte in motivazione, pulsione e funzioni esecutive mostravano un'attività ridotta.

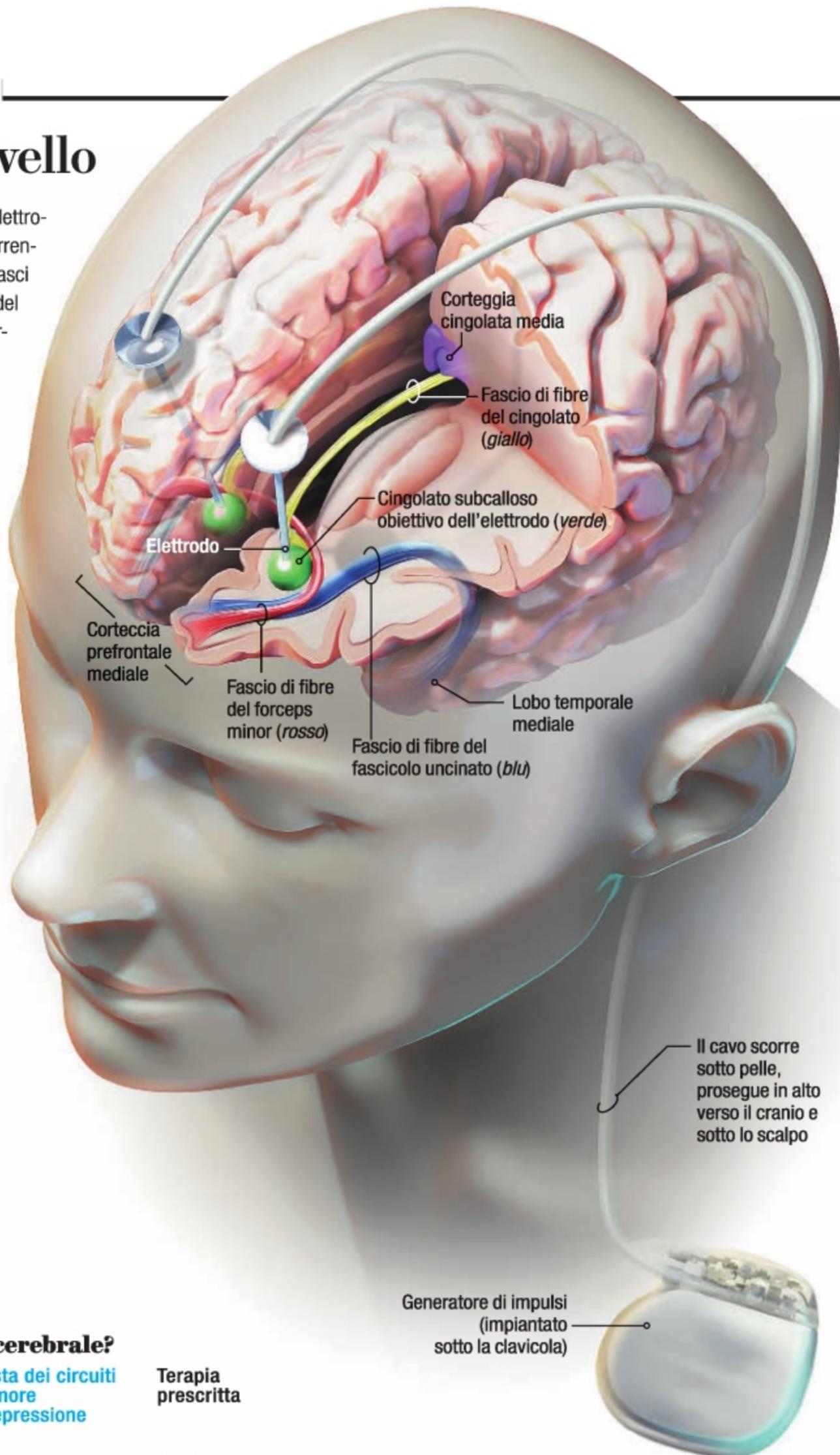
Il punto della scansione che mostrava una maggiore attività corrispondeva a una piccola regione centrale del cervello chiamata cingolato subcalloso, nota anche come area 25 di Brodmann, dal nome dello studioso tedesco di neuroanatomia che nel 1909

Resetare il cervello

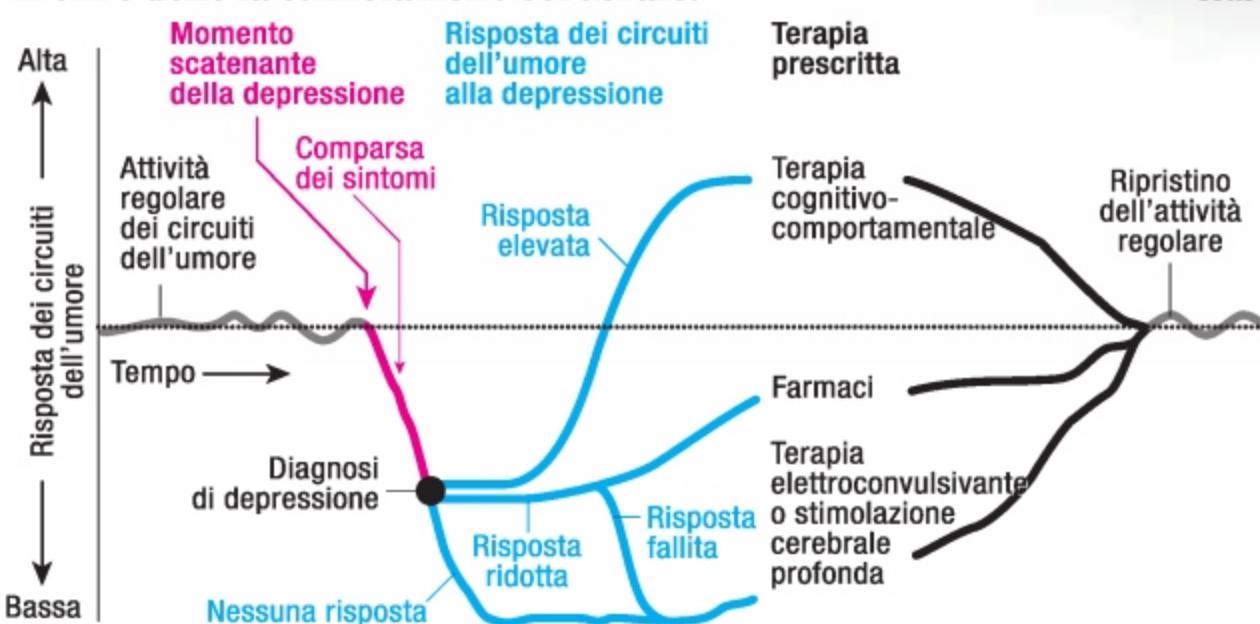
La stimolazione cerebrale profonda usa eletrodi collocati chirurgicamente per inviare corrente elettrica attraverso i circuiti neuronali (fasci di fibre nervose che collegano le regioni del cervello). Questi circuiti non funzionano correttamente nei pazienti che soffrono di depressione maggiore. La terapia, non ancora approvata per uso clinico, a volte può correggere irregolarità nei processi di trasmissione dei segnali e alleviare rapidamente il senso di disperazione e la mancanza di piacere.

Il bersaglio

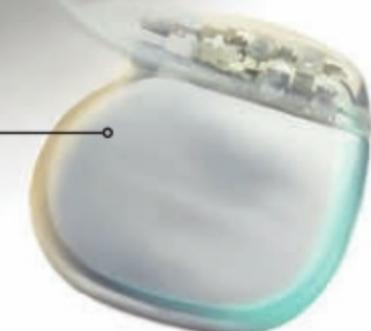
Gli eletrodi sono posizionati in modo da colpire diverse aree del cervello collegate tra loro. Vengono collocati vicino al cingolato subcalloso (verde), una regione di snodo da cui i circuiti che controllano i processi decisionali, le reazioni emotive e la memoria si ramificano ad altre parti del cervello. Alcune ramificazioni (rosso e blu) sono collegate alla corteccia frontale mediale e al lobo temporale mediale (blu), un'altra (giallo) invece alla corteccia cingolata media. Tutte queste aree presentano disfunzioni in caso di episodio depressivo.



A chi è utile la stimolazione cerebrale?



Generatore di impulsi
(impiantato
sotto la clavicola)



La depressione altera il regolare funzionamento dei circuiti neurali. Le scansioni cerebrali potrebbero indicare le terapie adatte a stimolare la tendenza naturale dei circuiti a reagire a questi squilibri e regolarli, per esempio confermando se la terapia cognitivo-comportamentale o i farmaci siano utili nel ripristinare l'equilibrio. Altre terapie, come la stimolazione cerebrale profonda, verrebbero applicate in caso di perdita della capacità di autoregolazione da parte dei circuiti.

disegnò una mappa del cervello usando indicazioni numeriche a seconda della distribuzione delle cellule in una sede specifica. Inoltre, Mayberg scoprì che l'attività della corteccia frontale diminuiva in modo proporzionale al grado di tristezza percepita.

In una seconda serie di esperimenti effettuati da Mayberg, i pazienti depressi ricevevano farmaci antidepressivi per diverse settimane. In seguito la PET aveva mostrato che, quando i sintomi dei pazienti si attenuavano, il miglioramento coincideva con un calo dell'attività nell'area 25 di Brodmann e un aumento dell'attività nella corteccia frontale. Sebbene le modifiche nell'attività cerebrale avvenissero anche in altre regioni, le differenze sostanziali nel cingolato subcalloso suggerivano che questa area svolgesse un ruolo essenziale nel modulare gli stati d'animo negativi.

L'area 25 di Brodmann è il punto di partenza e di arrivo di collegamenti tra numerose importanti aree del cervello, comprese sezione orbitale e mediale dei lobi frontali, ipotalamo, nucleus accumbens, amigdala e ippocampo, grigio periacqueduttale e rafe dorsale. Queste aree governano il modo in cui il cervello regola funzioni essenziali del comportamento, tra cui ciclo sonno-veglia, motivazione, reazioni ai pericoli percepiti e a stimoli nuovi, senso di gratificazione e rinforzo, memoria a breve termine e capacità di applicare l'esperienza nell'affrontare eventi futuri. Nella depressione, questi processi fondamentali non vanno per il verso giusto. Di conseguenza, aveva dedotto Mayberg, era probabile che l'elettrostimolazione di questo snodo dell'attività neurale avrebbe giovato ai pazienti depressi.

Chirurgia contro la depressione

Nel 2002 la stimolazione cerebrale profonda di altre regioni del cervello era stata approvata come terapia per il morbo di Parkinson e di un altro disturbo chiamato tremore essenziale; sapevamo quindi che sarebbe stato possibile applicarla agli esseri umani. Oggi oltre 100.000 pazienti in tutto il mondo sono stati sottoposti a questa terapia per alleviare i sintomi del Parkinson.

La procedura chirurgica di base per la depressione è la medesima. I pazienti selezionati per lo studio rientrano negli stessi criteri previsti per la nostra prima paziente al Toronto Western Hospital. Devono aver sofferto della malattia per un periodo minimo di un anno senza aver avuto alcun miglioramento assumendo almeno quattro tipi diversi di farmaci. Inoltre, non devono aver avuto miglioramenti con la terapia eletroconvulsivante oppure essersi rifiutati di usarla.

La stimolazione cerebrale profonda non è semplicemente un'altra forma di terapia eletroconvulsivante, che induce convulsioni controllate ma generalizzate sotto anestesia e prevede brevi sessioni ripetute nel corso di diverse settimane. La nuova tecnologia emette lievi impulsi elettrici verso una specifica regione del cervello collegata a diverse altre aree coinvolte nella depressione. I pazienti devono sottoporsi a chirurgia invasiva per l'impianto degli elettrodi che emetteranno la stimolazione, ma non subiscono perdita di memoria, come invece può accadere nella terapia eletroconvulsivante.

Il giorno dell'intervento della nostra prima paziente depressa al Toronto Western Hospital, la squadra di chirurgia ha incorniciato la testa della paziente con una struttura per mantenerla stabile. Grazie alla risonanza magnetica è stato identificato il punto speci-

fico del cingolato subcalloso in cui posizionare l'elettrodo. In sala operatoria, in anestesia locale e senza sedazione, i chirurghi hanno effettuato due fori nel cranio attraverso i quali poter inserire gli elettrodi.

Con l'aiuto di due esperti neurofisiologi dell'ospedale, William D. Hutchinson e Johathan O. Dostrovsky, abbiamo registrato per la prima volta l'attività cerebrale nel cingolato subcalloso per mappare l'attività dei neuroni in quella sede e studiarne la funzione. Sulla base di precedenti esperimenti di *imaging*, sospettavamo che queste regioni fossero coinvolte nell'elaborazione delle emozioni legate alla tristezza. Usando un microelettrodo dotato di una punta più sottile di un capello umano, abbiamo potuto misurare direttamente l'attività dei neuroni di questa regione del cervello.

Durante la registrazione dell'attività neurale, abbiamo mostrato alla paziente fotografie che ritraevano scene emotivamente forti sia in positivo sia in negativo. Grazie alle registrazioni abbiamo scoperto che quei neuroni si attivavano maggiormente quando la paziente guardava immagini tristi e angoscianti, mentre non reagivano a immagini felici, divertenti o neutre.

Abbiamo quindi inserito gli elettrodi per la stimolazione nell'area 25 di Brodmann su entrambi i lati destro e sinistro del cervello. Nel giro di pochi secondi dall'accensione della corrente, la paziente ha riportato una riduzione notevole del dolore mentale e del senso di disagio emotivo. Era come se qualcuno avesse sollevato un peso gravoso ed è una sensazione comune alla maggior parte dei pazienti, come abbiamo scoperto, ma non a tutti. Gli effetti della stimolazione sono stati più pronunciati alla prima applicazione, mentre dopo diverse stimolazioni, sono stati ottenuti in misura meno significativa.

Oggi sappiamo che, proseguendo l'applicazione per diversi giorni o settimane nello stesso punto, in genere il paziente ottiene benefici duraturi.

Grazie a questo e altri interventi, abbiamo compreso l'importanza di collocare in modo preciso i contatti elettrici che emettono un livello costante di stimolazione. Durante il primo intervento, la paziente ha provato sollievo solo quando uno o due dei quattro contatti emetteva un flusso di corrente costante.

Proseguendo con le osservazioni, Patricio Riva-Posse e Ki Sueng Choi, entrambi del laboratorio di Mayberg alla Emory University, hanno sviluppato un metodo di imaging per identificare con maggiore precisione i fasci di fibre nervose, noti come sostanza bianca, che si intersecano nell'area 25 di Brodmann e che, se sottoposti a stimolazione, sembrano produrre sia un sollievo immediato sia un effetto antidepressivo a lungo termine.

Una volta collocati e fissati al cranio gli elettrodi, un chirurgo impianta un generatore sottocutaneo di impulsi, che è simile a un pacemaker cardiaco, sotto la clavicola; si tratta di un pacemaker alimentato a batteria che stimola continuamente l'area bersaglio con 130 impulsi al secondo. Abbiamo scelto i parametri di stimolazione in parte basandoci sulla nostra esperienza di trattamento di malati di Parkinson, e finora sembra che questa stimolazione ad alta frequenza offra i migliori benefici per i pazienti.

Una volta selezionate le impostazioni, l'operazione è conclusa. In seguito, i medici useranno un telecomando *wireless* per regolare la stimolazione in ogni singolo paziente. Secondo la nostra esperienza, una volta stabilito un insieme di parametri efficaci, non saranno necessarie ulteriori modifiche nel tempo. Studi

successivi stabiliranno la necessità o meno di modificare le impostazioni per i pazienti che non rispondono ai parametri standard, oppure se parametri diversi possano accelerare gli effetti antidepressivi. Le batterie dovranno essere sostituite circa ogni tre anni e attualmente sono disponibili unità ricaricabili.

Perché un pacemaker cerebrale?

In alcuni pazienti i sintomi sono scomparsi completamente, ma la risposta alla terapia non è stata uniforme e non tutti ne hanno tratto beneficio. La percentuale di pazienti che registra una risposta clinica (una riduzione del 50 per cento o più sulle scale di misurazione della depressione) differisce tra i singoli ospedali ed è variata dal 40 al 70 per cento in un periodo di sei mesi. La variabilità nei risultati potrebbero dipendere dalle difficoltà nell'usare sintomi e scansioni cerebrali per identificare i pazienti più idonei alla stimolazione cerebrale profonda.

Uno studio che ha ricevuto una certa attenzione ha mostrato risultati deludenti. Sponsorizzato e condotto da un'azienda, la St. Jude Medical di St. Paul, Minnesota, nel 2013 lo studio ha sospeso l'accettazione di nuovi casi, anche se i pazienti già inseriti nel trial proseguono la terapia. Nonostante non siano sorti allarmi sulla sicurezza, un'analisi della Food and Drug Administration degli Stati Uniti a metà studio ha dimostrato che i pazienti sottoposti a impianto non ricevevano un sollievo sufficientemente più grande rispetto a un gruppo di pazienti i cui elettrodi erano spenti da sei mesi. I ricercatori stanno rivedendo la metodologia dello studio per determinare se la terapia possa essere migliorata con una diversa progettazione.

La ragione delle disparità tra i vari studi sulla stimolazione cerebrale profonda non è chiara. Potrebbero essere dovute ai diversi criteri di selezione dei pazienti, alcuni dei quali potrebbero avere una depressione combinata con altri sintomi psichiatrici. Anche le varie tecniche chirurgiche usate – che porterebbero a una diversa posizione degli elettrodi o un diverso metodo di emissione degli stimoli – potrebbero avere un ruolo. Un potenziale elemento di confusione è che alcuni pazienti potrebbero migliorare semplicemente perché convinti del potere della chirurgia (in altre parole, per l'effetto placebo) o perché aiutati psicologicamente dall'interazione con i medici. Alcuni di questi dubbi potrebbero risolversi con il tempo: studi più recenti suggeriscono che la terapia funziona, e la salute dei pazienti peggiora quando le batterie sono scariche o la stimolazione è interrotta. I pazienti si riprendono quando ricomincia la stimolazione, il che rende meno plausibile l'effetto placebo.

Sono in corso numerosi studi clinici ad Atlanta, Hanover e Toronto che forniranno nuovi importanti dati sull'effettivo potenziale della terapia. Nel frattempo i ricercatori perfezionano le tecniche chirurgiche per l'impianto degli elettrodi, cercano di capire come ottimizzare la quantità precisa di stimolazione per un determinato paziente e quali sono gli effetti a breve e lungo termine della stimolazione cerebrale profonda sulla depressione.

Nuovi percorsi di ricerca valutano la possibilità di stimolare i circuiti cerebrali in punti diversi, poiché l'area del cingolato subcalloso potrebbe non essere ideale per ogni paziente. Volker Coenen e Thomas Schläpfer, dell'Università di Bonn, hanno ottenuto un rapido miglioramento in un piccolo numero di pazienti stimolando una regione chiamata fascicolo mediale del proencefalo. Anche altre regioni cerebrali profonde sono considerate potenziali

bersagli, come striato ventrale, braccio anteriore della capsula interna, peduncolo talamico inferiore e habenula.

Testare l'elettrostimolazione nelle varie zone del cervello potenzialmente coinvolte nella depressione potrebbe permettere di selezionare bersagli sulla base di sintomi specifici, come avviene per il Parkinson. I pazienti depressi manifestano combinazioni variabili di sintomi che corrispondono a risultati diversi nelle scansioni cerebrali. Appare già molto probabile che l'analisi dei *pattern* corrispondenti ad attività cerebrali anormali sia uno strumento utile per decidere se l'opzione migliore sia la terapia farmacologica o quella cognitivo-comportamentale, e potrebbe esserlo anche per la stimolazione cerebrale profonda.

I tentativi di perfezionamento di queste tecniche devono essere integrati con ricerche più basilari per capire come la tecnologia modifichi il funzionamento cerebrale. Dopo un periodo di stimolazione prolungato gli effetti antidepressivi possono manifestarsi per giorni o settimane anche quando la stimolazione è interrotta. È possibile che il cervello subisca alterazioni durature

(un processo chiamato neuroplasticità) via via che i circuiti cerebrali si modificano come conseguenza della stimolazione. Studi sui roditori dimostrano che la stimolazione cerebrale profonda altera l'attività di ampie reti di circuiti cerebrali e può anche indurre la nascita di nuovi neuroni nell'ippocampo; un processo che, come dimostrato da altri studi, è importante sia per la creazione di nuovi ricordi sia per alleviare la depressione. Ma interrompendo la terapia per un lungo periodo i sintomi ricompaiono, dimostrando che il cervello non guarisce in modo permanente con questa terapia.

La capacità di controllare i circuiti elettrici con la stimolazione cerebrale profonda ha generato interesse verso un uso della tecnica in altri disturbi psichiatrici, come disturbo bipolare, disturbo ossessivo-compulsivo, sindrome di Tourette e dipendenze da alcol e droghe. La stimolazione cerebrale profonda potrebbe essere un'alternativa terapeutica nel caso in cui altre cure non siano efficaci e il disturbo sia legato al funzionamento anormale di circuiti.

Di recente Lozano ha applicato la stimolazione cerebrale profonda allo stesso bersaglio subcalloso usato per curare l'anoressia nervosa cronica grave. In alcuni pazienti che convivevano con il disturbo alimentare da dieci anni o più, la stimolazione ha alleviato sintomi come depressione, ansia e ossessività. I pazienti sono diventati meno ansiosi nei confronti del cibo, guadagnando così peso, e hanno potuto partecipare a programmi terapeutici. In circa metà dei 18 casi, il cambiamento dell'umore ha permesso ai pazienti di tornare al peso forma dopo un anno.

I risultati indicano nuove direzioni. La conoscenza crescente del funzionamento dei circuiti cerebrali aiuta a spiegare le anomalie dell'attività cerebrale. I neurochirurghi dovrebbero quindi poter inserire gli elettrodi in punti strategici in profondità nel cervello per garantire il sollievo tanto desiderato non solo a pazienti che non rispondono a farmaci e psicoterapia, ma anche a pazienti che soffrono di altri disturbi, dall'anoressia all'Alzheimer. ■

PER APPROFONDIRE

Probing and Regulating Dysfunctional Circuits Using Deep Brain Stimulation.
Lozano A. M. e Lipsman N., in «Neuron», Vol. 77, n. 3, pp. 406-424, 6 febbraio 2013.
The Brain Reward Circuitry in Mood Disorders. Russo S. J. e Nestler E. J., in «Nature Reviews Neuroscience», Vol. 14, pp. 609-625, settembre 2013.



AMBIENTE

Il nostro futuro dipende da quanto
saremo capaci di integrare

ENERGIA



ACQUA



CIBO



**UN
PUZZLE
PER IL
PIANETA**

di Michael E. Webber

Michael E. Webber è vicedirettore dell'Energy Institute all'Università del Texas ad Austin. Il suo prossimo libro *Thirst for Power*, che analizza l'uso di energia e acqua nel mondo, è in pubblicazione per tipi della Yale University Press.

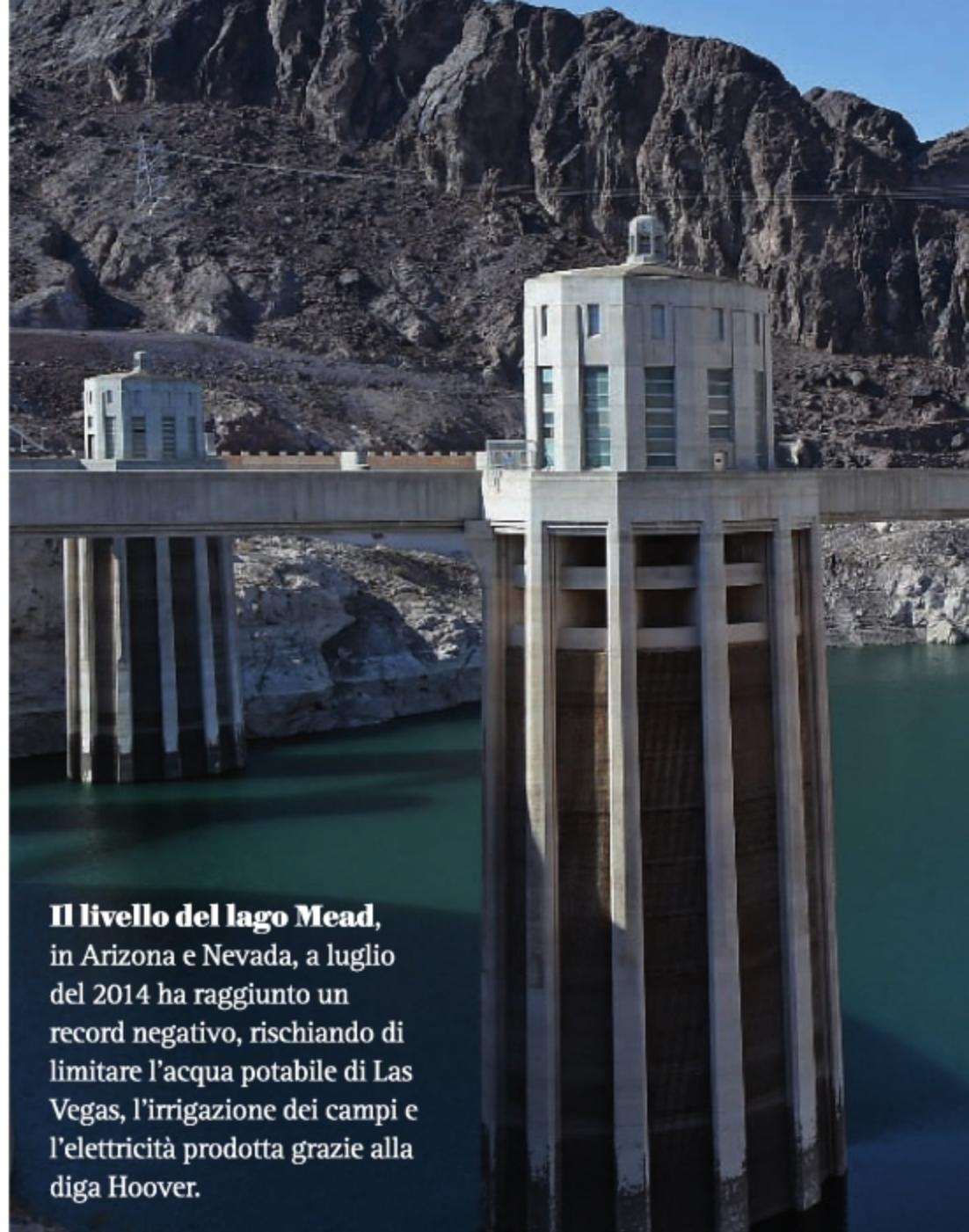


A luglio del 2012 tre reti elettriche regionali dell'India hanno smesso di funzionare, provocando il più grande *blackout* della storia. Oltre 620 milioni di persone – il 9 per cento della popolazione mondiale – sono rimaste senza corrente. Il motivo: lo stress del sistema per la produzione alimentare in seguito alla carenza di acqua.

A causa di una grave siccità, gli agricoltori hanno attivato sempre più pompe elettriche per estrarre sempre più in profondità l'acqua per l'irrigazione. Queste pompe, lavorando intensamente sotto il Sole torrido, hanno aumentato la domanda di energia alle centrali. Al tempo stesso, il basso livello di acqua ha fatto sì che le dighe idroelettriche generassero meno elettricità del solito.

A peggiorare la situazione, il deflusso proveniente da questi terreni agricoli durante le alluvioni avvenute nel corso dell'anno ha lasciato mucchi di sedimenti dietro le dighe, riducendo la capacità degli invasi. All'improvviso, una popolazione maggiore di quella europea e doppia di quella statunitense è rimasta al buio.

La California affronta un intreccio di problemi stranamente simile con energia, acqua e cibo. Un minore accumulo di neve, un record minimo di precipitazioni e il continuo sviluppo nel bacino del fiume Colorado hanno ridotto di un terzo la portata dei fiumi nella California centrale. Da questo stato proviene metà della produzione statunitense di frutta, verdura e frutta secca, e quasi un quarto di quella di latte, così gli agricoltori pompano acqua dalle falde a ritmi forsennati: l'estate scorsa alcune aree hanno raddoppiato la quantità di acqua pompata per l'irrigazione rispetto all'anno precedente. La Central Valley, lunga oltre 640 chilometri, sta letteralmente sprofondando in seguito all'estrazione di acqua



Il livello del lago Mead, in Arizona e Nevada, a luglio del 2014 ha raggiunto un record negativo, rischiando di limitare l'acqua potabile di Las Vegas, l'irrigazione dei campi e l'elettricità prodotta grazie alla diga Hoover.

da falde sotterranee. E proprio nel momento di maggiore bisogno di elettricità, Southern California Edison ha chiuso due grandi reattori nucleari per mancanza dell'acqua di raffreddamento. Il progetto di San Diego di costruire un dissalatore lungo la costa è stato ostacolato da attivisti che si opponevano alla sua realizzazione, sostenendo che avrebbe consumato troppa energia.

Energia, acqua e cibo sono le tre risorse più critiche a livello mondiale. Se questo fatto è ormai assodato tra i responsabili delle decisioni, è invece fortemente sottovalutata l'interdipendenza reciproca tra queste risorse: gli stress su una qualsiasi di esse possono ripercuotersi sulle altre. Questa situazione ha reso la nostra società più fragile di quanto crediamo e non siamo preparati al potenziale disastro che incombe.

Eppure, su centrali elettriche, infrastrutture idriche e terreni agricoli stiamo facendo scelte epocali, le cui conseguenze dureranno per molti decenni, rinchiudendoci in un sistema vulnerabile. Solo far fronte al fabbisogno energetico mondiale richiederà investimenti per 48.000 miliardi di dollari da oggi al 2035, stando a un rapporto del 2014 dell'International Energy Agency; secondo il suo direttore esecutivo c'è un rischio concreto «che gli investimenti siano male indirizzati» perché non si stanno valutando correttamente gli impatti.

IN BREVÉ

Il mondo cerca di migliorare gli approvvigionamenti di energia, acqua e cibo affrontandoli singolarmente, ma per risolvere queste sfide serve un sistema integrato, che avrà conseguenze positive anche su ambiente, povertà,

crescita demografica e malattie. **Ridurre lo spreco alimentare** può conservare energia e acqua. Le aziende agricole indoor possono usare le acque reflue urbane per l'irrigazione e fornire energia agli edifici che le ospitano. La crescita di

alge vicino alle centrali elettriche permette di trasformare acque reflue ed emissioni in alimenti o biocarburante. Le turbine eoliche nel deserto possono convertire l'acqua salmastra in acqua dolce. Una rete idrica efficiente permette di

risparmiare acqua ed energia. **Pianificatori e responsabili** delle decisioni su energia, acqua e cibo devono smettere di lavorare separatamente e progettare soluzioni integrate per le politiche e le infrastrutture.



Per risolvere questi enormi problemi bisogna adottare con urgenza un approccio complessivo, invece che tentare di affrontarli singolarmente. Molte aree abitate del pianeta sono colpite dalla siccità, i sistemi energetici sono ostacolati da vincoli ambientali e costi crescenti, e il sistema alimentare stenta a soddisfare una domanda in rapido aumento. L'intreccio tra cibo, acqua ed energia fa da scenario a molte delle zone più travagliate del mondo. Sgomosse e rivoluzioni in Libia e Siria, che hanno rovesciato governi, sono state provocate dalla siccità o dai prezzi alti degli alimenti. Per creare una società più integrata e resistente dobbiamo risolvere un rompicapo interconnesso, ma da dove si comincia?

Rischi o vantaggi a cascata

Il defunto premio Nobel Richard Smalley, della Rice University, indicò da dove iniziare in una conferenza nel 2003, quando evidenziò i «primi dieci problemi dell'umanità per i prossimi 50 anni». La sua lista era disposta in ordine decrescente di importanza: energia, acqua, cibo, ambiente, povertà, terrorismo e guerra, malattie, istruzione, democrazia e popolazione. Energia, acqua e cibo erano in cima perché risolvere questi problemi avrebbe contrastato quelli più in basso con un effetto a cascata. Per esempio, lo sviluppo di molte fonti di energia pulita, rinnovabile ed economica permette un'abbondanza di acqua potabile. L'abbondanza di acqua potabile ed energia (per produrre fertilizzanti e alimentare trattori) permette la produzione di cibo, e così via.

Per quanto brillante, la lista di Smalley perdeva di vista due importanti sfumature. Anzitutto, energia, acqua e cibo sono interconnessi. Inoltre, sebbene l'abbondanza di una risorsa permetta l'abbondanza delle altre, la carenza di una può provocare una carenza delle altre.

Con un'energia illimitata abbiamo tutta l'acqua che ci serve, perché possiamo dissalare gli oceani, scavare pozzi molto pro-

fondi e spostare l'acqua da un continente all'altro. Con un'acqua illimitata abbiamo tutta l'energia che ci serve, perché possiamo costruire centrali idroelettriche ovunque vogliamo o irrigare colture energetiche senza limiti. Con energia e acqua illimitate possiamo far fiorire i deserti e costruire aziende agricole *indoor*, che cioè sfruttano edifici, ad alto rendimento, in grado di produrre cibo tutto l'anno.

Naturalmente il mondo in cui viviamo non ha risorse illimitate, ma è segnato dalle ristrettezze. La probabilità che queste ristrettezze provochino crisi con effetto a cascata aumenta di pari passo con l'incremento demografico, l'allungamento della vita media e la crescita dei consumi.

Per esempio, il lago Mead vicino a Las Vegas, alimentato dal fiume Colorado, oggi è al livello più basso di sempre. La città estrae acqua potabile da un sistema che somiglia a due grandi cannucce immerse nel lago. Se il livello continua a calare, potrebbe scendere al di sotto di queste cannucce, grandi comunità agricole a valle potrebbero restare a secco e le enormi turbine nella diga Hoover sul lago fornirebbero meno energia, o potrebbero fermarsi del tutto. La soluzione di Las Vegas consiste nello spendere quasi 1 miliardo di dollari per una terza cannuccia che entrerà nel lago dal basso. Forse non servirà a molto: gli scienziati della Scripps Institution of Oceanography a La Jolla, in California, hanno scoperto che il lago Mead potrebbe prosciugarsi entro il 2021, se il clima cambierà come previsto e città e aziende agricole dipendenti dal fiume Colorado non ridurranno i prelievi di acqua.

In Uruguay i politici devono decidere se l'acqua negli invasi va usata per bere, irrigare i terreni o produrre elettricità. Nel 2008 il fiume Uruguay è sceso a un livello molto basso dietro la diga Salto Grande. Questa diga ha una capacità di produrre energia quasi pari alla diga Hoover, ma erano in funzione solo tre delle sue 14 turbine, dato che gli abitanti del luogo volevano raccoglie-

re l'acqua per l'agricoltura o i servizi municipali. I cittadini lungo il fiume e i loro leader politici si sono trovati a dover scegliere tra elettricità, cibo e acqua potabile. Le ristrettezze in un settore ne hanno provocate anche negli altri. Sebbene in Uruguay sia ormai passata, la minaccia si ripresenta in altre parti del mondo. Comunità in Texas e New Mexico, vittime della siccità, di recente hanno vietato o limitato l'uso dell'acqua destinata al *fracking* per petrolio e gas, risparmiandola per l'uso agricolo.

Circa l'80 per cento dell'acqua che consumiamo è impiegata in agricoltura, per il nostro cibo. Quasi il 13 per cento della produzione energetica è usato per estrarre, depurare, trasportare, riscaldare, raffreddare e smaltire la nostra acqua. I fertilizzanti realizzati con gas naturale, i pesticidi ricavati dal petrolio e il diesel per alimentare trattori e mietitrici aumentano la quantità di energia necessaria per produrre cibo. Le aziende alimentari, che richiedono una refrigerazione affamata di energia, producono merce avvolta nella plastica ricavata da sostanze petrolchimiche, e ci vuole altra energia per trasportare i prodotti dal negozio e cucinarli a casa. Questo intreccio è un gran caos, e tutto il sistema subisce i disturbi di qualunque sua parte.

Soluzioni tecniche

Sarebbe una follia costruire altre centrali elettriche e impianti di distribuzione e trattamento delle acque con una concezione vecchia, coltivare prodotti agricoli con metodi obsoleti ed estrarre ancora petrolio e gas senza rendersi conto delle ripercussioni reciproche tra queste attività. Per fortuna è possibile integrarle in modi sostenibili.

La misura più ovvia è ridurre i rifiuti. Negli Stati Uniti, almeno il 25 per cento del cibo viene buttato via. Visto che impieghiamo tanta energia e acqua nella produzione alimentare, ridurre la percentuale sprecata permette di risparmiare varie risorse contemporaneamente. Le soluzioni possono essere semplici, per esempio servire porzioni più piccole e mangiare meno carne, che richiede quattro volte più energia rispetto ai cereali. Inoltre possiamo mettere gli scarti alimentari e i rifiuti agricoli, come il letame, in digestori anaerobici che li trasformano in gas naturale. All'interno di queste sfere metalliche, che sembrano bolle luccicanti, i microbi decompongono la materia organica e questo processo produce metano. Adottando questa tecnologia su vasta scala – nelle case, nei negozi di alimentari e in punti centrali come le aziende agricole – si creerebbero nuove energie e fonti di reddito, riducendo al tempo stesso l'impiego di energia e acqua necessario per il trattamento dei rifiuti.

Le acque reflue sono un altro sottoprodotto che potremmo trasformare in una risorsa. In California, a San Diego e Santa Clara si usano le acque reflue trattate per irrigare i terreni. L'acqua è tanto pulita da essere perfino potabile, il che potrebbe sostenerne l'approvvigionamento idrico comunale, se i legislatori statali lo permettessero.

I sostenitori delle fattorie urbane, come Dickson Despommier della Columbia University, hanno progettato «fattorie verticali» che sarebbero situate in grattacieli di vetro. Gli abitanti di New York City, per esempio, producono quasi quattro miliardi di litri di acque reflue al giorno, e la città spende cifre enormi per depurarle abbastanza da poterle scaricare nel fiume Hudson. Queste acque depurate potrebbero invece irrigare le coltivazioni in una fattoria verticale, per produrre cibo riducendo al tempo stesso la

sua domanda di acqua dolce. I solidi estratti dai rifiuti liquidi in genere vengono bruciati, ma invece potrebbero essere inceneriti per produrre elettricità per questo grande palazzo, diminuendo la domanda energetica. E poiché gli alimenti freschi sarebbero coltivati proprio dove vivono e lavorano molti consumatori, si ridurrebbe la necessità di trasportarli su autocarri, con un potenziale risparmio di energia ed emissioni di anidride carbonica.

Alcune *start-up* cercano di usare acque reflue e CO₂ provenienti dalle centrali elettriche per coltivare alghe nelle loro immediate vicinanze. Le alghe si nutrono di gas e acqua, e gli addetti le raccolgono per farne mangime per animali e biocarburante, affrontando così il quarto punto prioritario nella lista di Smalley, proteggere l'ambiente, togliendo composti dall'acqua e CO₂ dall'atmosfera.

Potremmo imbrigliare la stessa anidride carbonica per creare energia. I miei colleghi all'Università del Texas ad Austin hanno progettato un sistema in cui la CO₂ di scarto delle centrali elettriche è iniettata in grandi depositi di salamoia a notevoli profondità. La CO₂ resta sommersa, quindi è eliminata dall'atmosfera, ed emette metano caldo che arriva in superficie, dove si può vendere per produrre energia. Inoltre, il calore può essere sfruttato dall'industria.

Un altro metodo per risparmiare più risorse allo stesso tempo è la conservazione intelligente. Usiamo più acqua con interruttori e prese che con rubinetti e diffusori delle docce, dato che serve molta acqua per raffreddare le centrali elettriche, lontane dalla vista e dai nostri pensieri. Inoltre, usiamo più energia per riscaldare, trattare e pompare l'acqua che per l'illuminazione. Spegnere luci e apparecchi fa risparmiare enormi quantità di acqua, e chiudere l'acqua fa risparmiare enormi quantità di energia.

Possiamo anche concepire modi nuovi e migliori di usare energia e acqua per coltivare in luoghi insoliti. In zone del sud-ovest deserto degli Stati Uniti, a scarse profondità c'è una ricchezza di acqua di falda salmastra, e abbondano anche vento ed energia solare. Queste fonti di energia sono problematiche perché il Sole non splende di notte e il vento soffia in modo discontinuo. Tuttavia per la dissalazione non è un problema, perché l'acqua potabile si può facilmente immagazzinare e usare in seguito. Dissalare l'acqua di mare richiede molta energia, l'acqua salmastra di falda però è nettamente meno salata. Secondo la nostra ricerca all'Università del Texas ad Austin, dal punto di vista economico è meglio usare l'energia eolica intermittente per depurare l'acqua di falda salmastra che per produrre elettricità. E naturalmente, con l'acqua trattata si possono irrigare le coltivazioni. In questo caso l'intreccio gioca a nostro favore.

Lo stesso principio può migliorare la fratturazione idraulica per petrolio e gas. Un effetto collaterale negativo è che il gas di scarto, per lo più metano, che risale dal pozzo è bruciato in aria. Questo fenomeno, detto *flaring*, è così consistente che di notte lo si può vedere dallo spazio. I pozzi inoltre producono molte acque reflue: milioni di litri di acqua dolce, iniettati nei pozzi per il *fracking*, ne escono pieni di sali e altre sostanze chimiche. Una soluzione intelligente consiste nell'usare il metano per alimentare distillatori o altri macchinari basati sul calore per depurare l'acqua, rendendola riutilizzabile sul posto, risparmiando acqua dolce ed evitando al tempo stesso spreco di energia ed emissioni del *flaring*.

Inoltre possiamo migliorare l'approvvigionamento idrico a case



Passeggeri a Calcutta, India, rimasti a piedi in seguito a un enorme blackout nel 2012, provocato dal numero eccessivo di pompe che cercavano di irrigare le aziende agricole durante la siccità.

e aziende. I sensori incorporati in reti intelligenti contribuiscono a rendere più efficiente la distribuzione dell'elettricità. Il nostro sistema idrico però è ancora più stupido di quello elettrico. Misuratori obsoleti, ormai secolari, non sono in grado di rilevare con precisione l'uso dell'acqua, e secondo gli esperti i tubi antiquati perdono dal 10 al 40 per cento dell'acqua trattata che vi scorre. Incorporando sensori di dati *wireless* nel sistema di approvvigionamento idrico si aiuterebbero i gestori dei servizi a ridurre le perdite, sia di acqua sia di denaro. Inoltre una gestione efficiente dell'acqua aiuterebbe gli utenti a tenere sotto controllo i propri consumi.

E possiamo rendere più intelligente anche il sistema alimentare. Un motivo di questo grande spreco di cibo è che molti negozi, ristoranti e consumatori si basano sulle date di scadenza, che stimano in modo approssimativo se un alimento si è guastato. Un prodotto non è venduto né consumato dopo la data di scadenza, anche quando è ancora buono perché è stato conservato correttamente alla giusta temperatura. Sarebbe più intelligente usare sensori per valutare direttamente gli alimenti. Per esempio, sulle confezioni potremmo usare inchiostri sensibili alla temperatura, in grado di cambiare colore se esposti a una temperatura sbagliata o se cominciano a svilupparsi microrganismi indesiderati, sintomo di deterioramento. Possiamo installare sensori lungo la filiera per misurare le tracce di gas rilasciate da frutta e verdura mentre marciscono. Questi stessi sensori possono permettere controlli più stretti sulla refrigerazione, in grado di prevenire le perdite.

BIKAS DAS/AP Photo

Riconsiderare le politiche

Anche se molte soluzioni tecniche possono migliorare l'intreccio tra energia, acqua e cibo, spesso non le sfruttiamo perché, a livello ideologico e politico, le nazioni non hanno capito fino in fondo quanto queste risorse siano collegate tra loro. Responsabili delle decisioni, imprenditori e tecnici spesso lavorano separatamente, su un aspetto o sull'altro della questione.

Purtroppo, aggraviamo i problemi perché a decidere su politiche, supervisione e finanziamenti sono istituzioni distinte. I pianificatori del settore energetico danno per scontato di avere l'acqua necessaria, quelli del settore idrico di avere l'energia necessaria. Quelli del settore alimentare riconoscono i rischi della siccità, ma aumentano potenza delle pompe e profondità delle trivellazioni alla ricerca di acqua. L'innovazione più importante necessaria è un pensiero che consideri la connessione tra le risorse.

Questo tipo di pensiero può determinare l'adozione di politiche più lungimiranti. Per esempio, si può sovvenzionare la ricerca su tecnologie energetiche a basso consumo di acqua, tecnologie idriche a basso consumo di energia e tecniche per produzione, deposito e monitoraggio degli alimenti che evitino gli sprechi, riducendo la domanda di energia e acqua. Ponendo standard di efficienza relativi a più risorse si possono prendere due piccioni con una fava. Anche i regolamenti edilizi possono ridurre gli sprechi e migliorare le prestazioni. La concessione di permessi per nuovi siti energetici dovrebbe richiedere valutazioni dell'impronta idrica e viceversa. E i responsabili delle decisioni possono allestire fondi di credito rotativi, investimenti di capitale o sgravi fiscali per le istituzioni che adottano questi tipi di soluzioni tecniche.

Un segnale incoraggiante è la dichiarazione rilasciata da 300 delegati di 33 paesi alla Nexus 2014: Water, Food, Climate and Energy Conference, svoltasi a Chapel Hill, North Carolina. La dichiarazione, scritta non solo da esponenti politici ma anche da rappresentanti di Banca Mondiale e World Business Council for Sustainable Development, ha affermato che «il mondo è un unico sistema complesso ed è necessario cercare soluzioni e interventi sulle politiche che favoriscono il sistema nel suo insieme».

Come ha fatto notare Smalley, si può partire dall'energia. Dobbiamo pensare a come usare il nostro settore energetico per risolvere numerosi problemi insieme. Per esempio, le politiche concentrate ossessivamente solo sulla riduzione del livello di CO₂ in atmosfera potrebbero portarci a scelte energetiche con basse emissioni di carbonio ma un notevole dispendio di acqua, come le centrali nucleari o quelle a carbone con cattura del carbonio.

In gioco c'è anche la responsabilità personale. La domanda di insalate fresche, che in inverno arrivano sulla nostra tavola percorrendo migliaia di chilometri, crea un sistema di distribuzione dispersivo e affamato di energia. Le nostre scelte per avere sempre di più non fanno che portare le risorse al limite. L'intreccio tra energia, acqua e cibo è il problema più pressante che il pianeta deve affrontare. Per citare il defunto George Mitchell, padre del moderno fracking e fautore della sostenibilità: «Se non riusciamo a risolvere il problema per sette miliardi di persone, come faremo quando saranno nove miliardi?» ■

PER APPROFONDIRE

Liberation Power: What Do Women Need? Better Energy. Kirshenbaum S.R. e Webber M.E., in «Slate», pubblicato on line, 4 novembre 2013.

The Ocean under Our Feet. Webber M.E. in «Mechanical Engineering», p. 16, gennaio 2014.

Scacco matto all'effetto serra. Bryant S.L., in «Le Scienze», n. 547, marzo 2014.

Ritenuto estinto fino alla sua scoperta, nel 1938, il celacanto (*Latimeria chalumnae*), qui al largo delle Isole Comore, vive in acque molto profonde – da 150 fino a 700 metri – riparandosi in buchi nella roccia da cui esce solo di notte per cacciare.



Peter Scoones/SPL/Contrasto

La verità sui fossili viventi

Malgrado ogni apparenza contraria, nessuna specie sfugge alla selezione, anche quando è difficile individuarne i passaggi nella documentazione fossile

di Alexander J. Werth e William A. Shear

Guardare un limulo è un po' come dare un'occhiata ai mari ancestrali dell'Ordoviciano di quasi mezzo miliardo di anni fa. Charles Darwin fu tanto colpito dall'aspetto così antico di questa e altre creature – dipnoi, lamprede, brachiopodi e licopodi – da coniare per descriverli l'espressione «fossili viventi». Nel suo fondamentale trattato del 1859, *L'origine delle specie*, scrisse che queste specie d'aspetto primitivo sono «residui di un ordine un tempo preponderante... che, come i fossili, collegano in una certa misura ordini che oggi sono vastamente separati sulla scala della natura». Queste «forme anomale», scriveva, sono «durate fino al tempo presente».

Darwin era rimasto colpito dall'insolita forma arcaica dei tre tipi, ben separati, di dipnoi (*Protopterus*, *Neoceratodus* e *Lepidosiren*, diffusi rispettivamente in Africa, Australia e Sud America), pesci con grossi polmoni, notocorda cartilaginosa e pinne carnose e lobate, che somigliano a creature a noi note solo dalla documentazione fossile. Analogamente, il celacanto (*Latimeria*), altro pesce a pinne lobate, era ben noto dai fossili ma si riteneva estinto nel tardo Cretaceo, fino alla scoperta nel 1938 di una specie vivente. Ancora, una conifera come la *Metasequoia* era nota solo da fossili di età tra i 10 e i 100 milioni di anni, prima di essere scoperta in una remota valle cinese nel 1943; oggi è una diffusa pianta ornamentale che cresce facilmente nelle regioni temperate.

«Fossile vivente» è ancora oggi un termine evocativo e del tutto appropriato per queste forme viventi. Riesce a esprimere la sorpresa e lo sconcerto suscitato da specie che mantengono strutture anatomiche risalite dalle profondità geologiche del tempo. Questo curioso fenomeno solleva interrogativi di ordine evolutivo ed ecologico: come mai, per esempio, questi *taxa* sembrino rimasti immutati per tanto tempo, o come sia possibile distinguere tra una specie e l'altra sui tempi lunghi della storia del pianeta senza conoscerne né la genetica né le altre caratteristiche riproduttive che hanno un ruolo cruciale nel modo in cui oggi concepiamo la speciazione. Non c'è dubbio che i fossili viventi offrano, come pensava Darwin, un'opportunità senza precedenti per studiare – e raccontare in modo affascinante – grandi questioni sull'estinzione, la competizione e la velocità del cambiamento, sia morfologico sia genetico, nell'evoluzione. E rivelano anche le importanti e spesso irriducibili difficoltà di comprendere il concetto di specie su tempi così lunghi.

Che cos'è un fossile vivente?

Il termine «fossile vivente», malgrado ci dia una descrizione di forte seduzione evocativa, pone di per sé serie difficoltà sia allo scienziato sia al semplice curioso. Eppure, malgrado la sua ambiguità e la mancanza di una definizione semplice e universale, mantiene un valore euristico. Una delle caratteristiche principali di un fossile vivente è la sua forma antica o arcaica, almeno all'osservazione esterna, che sembra risalire a epoche lontanissime. Questa conservazione della morfologia, ben visibile nel limulo o nel celacanto, è resa ancor più notevole dal fatto che abbiamo fossili sorprendentemente simili risalenti al passato geologico. I fossili viventi sono rappresentanti di gruppi per il resto estinti, spesso comuni nella documentazione fossile. Alcuni di essi erano stati ritenuti estinti, ma non è indispensabile che vi sia un «gemello» o quasi fra i fossili per parlare di fossile vivente. Si stima che la divergenza tra la specie *Protoanguilla palau*, scoperta nel 2010, e le altre anguille risalga a circa 200 milioni di anni fa; questa anguilla è stata definita un primitivo fossile vivente anche in assenza di corrispondenze strette nell'archivio fossile noto.

Gran parte della sorpresa con cui fu accolta la scoperta del celacanto nel 1938 può essere attribuita al fatto che i celacantifor-

Alexander J. Werth è docente di biologia all'Hampden-Sydney College, in Virginia. Si occupa di morfologia funzionale e biomeccanica dell'alimentazione nelle balene.



William A. Shear insegna biologia all'Hampden-Sydney College. Studia l'evoluzione dei primi ambienti terrestri. L'originale di questo è articolo è stato pubblicato su «American Scientist» di novembre-dicembre 2014.



mi fossili erano ampiamente noti ai paleontologi, mentre non se ne conosceva alcuna specie vivente. Ma in realtà, non sono mai stati trovati fossili di specie attuali come *Latimeria chalumnae* o *L. menadoensis* (due celacanti, rispettivamente, dell'Oceano Indiano occidentale e dell'Indonesia), e ciò esclude che, strettamente parlando, i *Latimeria* siano fossili viventi, e smentisce le affermazioni secondo cui queste specie dimostrerebbero un'assenza di evoluzione. Resta però che i fossili viventi sono taxa che tendono ad avere solo controparti fossili, e non moderne.

Sfortunatamente, i creazionisti si impadroniscono sempre più spesso di questo termine per piegarlo ai propri fini. Nel suo *Atlante della creazione*, che accoppia le foto di una serie di fossili viventi con quelle di analoghi fossili antichi, il creazionista turco Harun Yahya inventa un'inesistente «disperazione dei darwinisti di fronte a questi fossili, perché dimostrano che il processo evolutivo non è mai esistito». Cercando «*living fossil*» su Internet si trova una preponderanza di siti creazionisti, malgrado il fatto che queste specie non confutano e non forniscono alcuna prova contraria alla nostra corrente concezione dell'evoluzione, che rimane il fondamento delle scienze della vita. Non esiste alcuna specie «non evoluta», nessun fossile risuscitato e tornato letteralmente

IN BREVÉ

Coniata da Darwin, l'espressione «fossile vivente» è in uso fin dai suoi tempi per indicare organismi che sembrano immutati rispetto a certi esemplari fossili, come il ginkgo o i limuli.

La sua applicazione è stata però fonte di confusione via via che la biologia progrediva nella comprensione dell'evoluzione e della genetica. È quindi ancora utile servirsi del termine?

Secondo gli autori, la risposta è positiva, poiché i fossili viventi ripropongono profonde questioni scientifiche e filosofiche sul concetto di specie. **Non è chiaro** quanto della loro

longevità dipenda da fattori ecologici estrinseci e non da fattori genetici, ma da questi organismi possiamo trarre insegnamenti sul ruolo delle contingenze stocastiche nella storia evolutiva.



alla vita; e nessun organismo oggi vivente è davvero identico a una specie estinta presente nella documentazione fossile.

Quel che rende speciali i fossili viventi, secondo Piotr Naskrecki, biologo evoluzionista della Harvard University, è che mostrano una superficiale somiglianza con i loro predecessori in quanto membri di antichi lignaggi genetici che, pur senza estinguersi, si sono «disseccati nel tempo, riducendosi dall'impetuoso fiume di specie di un tempo a un semplice rivoletto, prima di scomparire». Ma possono continuare a vivere in modi sorprendenti. Naskrecki sottolinea che la nostra economia, basata sui combustibili fossili, è alimentata dagli alberi che dominavano le foreste palustri del Carbonifero, precursori di piccole piante che calpestiamo oggi ogni giorno come licopodi ed equiseti, che sono fossili viventi.

Aver conservato caratteri antichi non basta, da solo, a dare un quadro completo di che cosa sia un fossile vivente. *Escherichia coli* e altri batteri hanno tuttora molti caratteri delle prime forme di vita della Terra (e in questo senso sono più vicini, rispetto a molte altre specie, all'antenato universale di tutti i viventi), ma nessuno direbbe che sono fossili viventi, non tanto perché sono semplici quanto perché sono dappertutto. Se i fossili viventi fossero definiti unicamente dalla forma arcaica, si potrebbe sostenerne che ne siamo circondati a terra e in mare, vista la profusione di lombrichi e meduse. Un'altra caratteristica essenziale è dunque la rarità: i fossili viventi sono tipicamente rari e di scarsa diversità tassonomica. Possono spiccare, come il ginkgo, quali organismi eccezionali privi di parenti stretti tra i viventi, ma che un tempo, secondo l'archivio fossile, erano comuni, diversificati e diffusi.

Nessuna delle specie generalmente riconosciute come fossili viventi rientra in una definizione unica che le comprenda tutte. Alcune sono rare o hanno una distribuzione geografica ristretta, ma

Un fossile dell'Ordoviciano, *Lunaspis aurora* (a sinistra, in alto), appare quasi identico all'odierno limulo atlantico (*Limulus polyphemus*, sopra). Anche se i biologi potessero ripercorrerne tutta l'evoluzione non sarebbe possibile definire un punto in cui una specie è mutata in un'altra. Ma sappiamo che non c'è stata possibilità di incrocio tra loro, e quindi sono due specie diverse.

Il celacanto, un pesce vivente (*Latimeria*, accanto) ha una notevolissima somiglianza, e un'ovvia parentela, con forme estinte (celacanto del Devoniano, a fronte). Ma l'apparenza inganna: non è la stessa specie. Quando fu scoperto, nel 1938, dalla naturalista sudafricana Marjorie Courtenay-Latimer nell'Oceano Indiano, questo pesce fu acclamato come un fossile tornato in vita.

altre sono comuni e diffuse. I limuli si trovano in regioni disparate, e malgrado l'attuale declino delle varie popolazioni restano abbondanti. Grazie alla capacità di resistere all'inquinamento, gli alberi di ginkgo prosperano negli ambienti urbani; altri fossili viventi, come il nautilo (della famiglia dei Nautilidae) e certi vermi appartenenti al *phylum* degli Onychophora, non sono comuni ma hanno una distribuzione biogeografica di notevole ampiezza.

Anche se in generale c'è un ampio accordo su che cosa sia un fossile vivente, alcuni insoliti candidati sono occasionalmente inseriti nella categoria per vari motivi. Un recente lavoro descrive la *Caperea* o balena franca pigmea, come l'unica sopravvissuta delle Cetotheriidae, un'antica linea di discendenza delle balene dotate di fanoni. Fra gli altri esempi molto citati di fossili viventi vi sono organismi di ogni tipo, dalle lamprede all'araucaria fino ai crostacei Anostraci. Forse la cosa più prossima a un vero e proprio fossile vivente è *Paleodictyon nodosum*, un'enigmatica creatura che nessuno ha mai visto viva ed è nota solo da tane esagonali a nido d'ape scavate in fondali profondi, virtualmente identiche a quelle fossili trovate in depositi vecchi di 50 milioni di anni.

Le analisi dei fossili mostrano che in genere una specie esiste in media per un tempo compreso tra 0,5 e 3 milioni di anni. Questa scala temporale rende ovviamente problematico il concetto di fossile vivente, che presuppone che una specie possa restare immutata per tempi assai lunghi. Anche se appaiono simili a specie esistite centinaia di milioni di anni fa, cycas e celacanti non rappresentano la continuazione di specifiche specie per un tempo così lungo. Sappiamo che ogni essere vivente evolve e si adatta al suo ambiente di continuo. Come fa notare Naskrecki, i fossili viventi non sono sopravvissuti miracolosamente; tuttavia, pur essendo geneticamente distinte dagli organismi ormai perduti da

lungo tempo, le forme arcaiche potrebbero essere portatrici di antichi geni, forse scomparsi dal resto della Terra.

L'espressione «fossili viventi» resta insomma un problematico ossimoro, ma ormai è in uso da tanto tempo che non siamo in grado di proporre una vera alternativa. Pur con l'ambiguità e la scarsa uniformità del suo uso, secondo noi questo termine ha ancora una sua utilità in tema di evoluzione, ecologia e tassonomia.

All'interno, il cambiamento non si ferma

Una lezione da trarre dallo studio dei fossili viventi è che descrivere gli organismi come primitivi o progrediti è futile. Già Darwin metteva in guardia contro l'uso di questi termini, che però vengono da una nozione intuitiva – la visione dell'evoluzione come un cammino verso l'alto, con gli esseri umani al vertice – che è difficile dissolvere, malgrado sia stata soppiantata nella biologia moderna dall'idea dell'organismo come mosaico di caratteri conservati più antichi e nuovi tratti più recenti.

Gli esseri umani, per esempio, condividono certi tratti con gli altri primati (visione stereoscopica, unghie invece di artigli), con gli altri mammiferi (peli, ghiandole mammarie), con gli altri vertebrati (spina dorsale, cordone spinale, denti) e anche con la maggior parte degli altri animali (occhi e arti a coppie, intestino tubulare, cavità corporea). D'altro canto, come ogni altra specie, quella umana ha caratteri propri e unici: locomozione bipede, cervello assai grosso e uso del linguaggio simbolico. Un classico esempio di mosaico è l'ornitorinco, che fonde tratti ancestrali (deposizione delle uova, scarse capacità di termoregolazione) con tratti altamente derivati, come il becco elettrosensibile simile a quello delle oche e gli speroni velenosi del maschio.

Sappiamo che varie piante (fra cui cycas, equiseti e licopodi, e anche ginkgo, metasequoia e wollemia) e animali (lampreda, storione e nautilo) visti dall'esterno appaiono antichi per molti aspetti, ma non è detto che la conservazione di una forma esterna arcaica valga anche per la biochimica o il comportamento. D'altra parte l'archivio fossile preserva la forma esterna, ma non il resto del fenotipo, con l'eccezione di tane, impronte e altre tracce fossili che possono chiarire il comportamento, per cui è difficile dire se e quanto i celacanti siano cambiati dal Devoniano a oggi. I biologi sanno che gli antichi pesci celacantiformi vivevano in acque dolci, contrariamente alle due specie attuali, quindi almeno nella regolazione osmotica e ionica la loro fisiologia deve aver sperimentato cambiamenti rilevanti.

In breve, non dobbiamo aspettarci che tutti gli aspetti della biologia del celacanto o del limulo siano immutati da centinaia di milioni di anni. Questo, purtroppo, cancella la speranza di Darwin secondo cui i taxa fossili viventi possano darci informazioni dirette su come era il mondo in tempi remoti. A prima vista, il tuatara (*Sphenodon punctatus*) somiglia a una lucertola, invece è il solo rincoscelo sopravvissuto: un rettile senza squame, contrariamente a lucertole e serpenti. Ha caratteri scheletrici e dentali arcaici e mantiene l'occhio pineale mediano, ma negli ultimi 200 milioni di anni è cambiato per molti altri versi. Le recenti ricerche mostrano che la sua evoluzione molecolare è più rapida di quella di ogni altra creatura nota, e dunque il suo materiale genetico è cambiato assai più in fretta della sua forma esterna. Questi mutamenti sono una forte prova contraria dell'idea, diffusa quanto sbagliata, secondo cui i fossili viventi abbiano smesso di evolversi e siano ri-

masti immutati per milioni di anni. Anche per altri fossili viventi, come cycas, celacanti e crostacei dell'ordine dei Notostraci, recenti studi delle variazioni molecolari smentiscono questo mito.

L'evoluzione è una sorta di *bricolage* di materiali preesistenti, non modella nuove specie dalla creta vergine. La maggior parte delle architetture corporee animali è ancora immutata dall'esplosione di diversità del Cambriano, 530 milioni di anni fa. Squali e scorpioni, scarafaggi e coccodrilli, sono tutti presenti da tempo nella documentazione fossile, anche se non nella forma attuale. Ognuno dei vermi o delle meduse che si evolvono oggi è un'elaborazione di un'antica forma, quindi è impossibile dire fino a che punto una specie debba essere conservatrice per poterla mettere tra i fossili viventi. In un senso tutt'altro che metaforico, tutti gli organismi hanno nel proprio corpo pezzi di forme di vita più antiche, che si tratti di enzimi e reazioni biochimiche primordiali o di parti strutturate secondo piani preistorici codificati in sequenze di DNA che a loro volta possono essere antiche quanto la vita stessa, residui di antenati remotissimi. Come tutte le specie, anche noi esseri umani abbiamo ancora nel nostro genoma una preponderanza di geni che risalgono a miliardi di anni fa. Quasi il dieci per cento del genoma umano è costituito da retrovirus endogeni, resi-

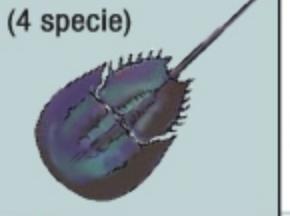
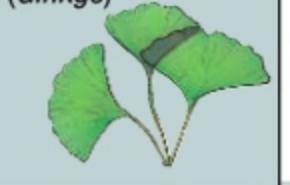
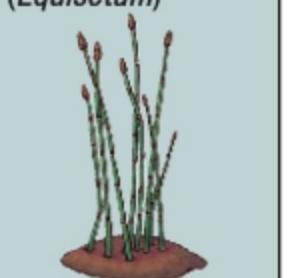
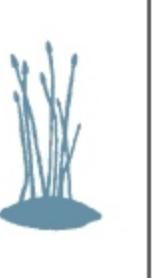
dui arcaici di DNA virali che hanno finito per integrarsi nel DNA dell'ospite e oggi sono ereditati con esso. La meraviglia dell'evoluzione sta nel fatto che mentre nessun organismo è fino in fondo un fossile vivente tutti gli organismi lo sono in una certa misura.

Alcuni biologi ipotizzano che i puri e semplici cambiamenti genetici non si traducano in cambiamenti evolutivi e anzi potrebbero essere inversamente correlati a essi. Un caso significativo potrebbe essere *Protopterus aethiopicus*, un dipnoo africano. Malgrado il suo aspetto antico, questa specie ha il primato di

grandezza del genoma, con 133 miliardi di coppie di basi. Le mutazioni si accumulano nel DNA, nel ticchettio regolare di un orologio molecolare che indica da quanto tempo è avvenuta la divergenza tra le linee di discendenza, e anche nei taxa fossili viventi l'orologio cammina senza sosta, nelle regioni codificanti e in quelle non codificanti del DNA mitocondriale e di quello nucleare, dimostrando con chiarezza l'indipendenza dell'evoluzione molecolare da quella morfologica e smentendo l'idea che a spiegare i taxa fossili viventi sia una significativa mancanza di variazione genetica.

Perché i fossili viventi sembrano immutati

Un mistero che da tempo tormenta i biologi è perché certe forme dall'aspetto antico persistano tanto a lungo senza evolversi in nuove forme. In un libro del 2010, *Biology's First Law*, Daniel McShea e Robert Brandon sostengono che c'è una tendenza automatica all'aumento della diversità e della complessità in tutti i sistemi evoluzionistici, di modo che ogni specie «statica» merita una sua spiegazione particolare. Come premessa alla ricerca di possibili spiegazioni, pensiamo all'ascia a mano bifacciale dei nostri antenati ominini dell'Acheuleano – l'apice dell'alta tecnologia preumana – che è rimasta immutata per un milione di anni. Più tardi, invece, le punte di pietra hanno subito rapidi cambiamenti. I telefoni cellulari e gli altri dispositivi elettronici dei nostri giorni cambiano costantemente e sono praticamente già obsoleti quando li tiriamo fuori dalla scatola. Eppure, c'è voluto comunque un secolo affinché gli ingegneri arrivassero a migliorare la

	Il taxon presenta questa caratteristica dei fossili viventi	Il taxon non presenta questa caratteristica dei fossili viventi	Il taxon presenta solo in parte questa caratteristica dei fossili viventi		
	Conservazione di morfologia ancestrale	Apparente stasi su tempi geologici	Somiglianza ad antiche forme fossili	Distribuzione limitata e residuale	Bassa diversità tassonomica
Celacanto (<i>Latimeria</i> , 2 specie)					
Limulo (4 specie)					
Ginkgo (<i>Ginkgo</i>)					
Vermi onicofori (<i>Onychophora</i> , circa 180 specie)					
Dipnoi (3 generi)					
Nautili (6 specie)					
Tuatara (<i>Sphenodon</i>)					
Equiseti (<i>Equisetum</i>)					

prima lampadina a incandescenza di Edison, e altre invenzioni sono sopravvissute nella forma iniziale essenzialmente senza modifiche, da cose semplici come sedie, matite e sandali a oggetti più elaborati come motori a combustione interna e batterie al piombo. Come mai queste invenzioni, come i taxa fossili viventi, sono rimaste uguali così a lungo?

In un libro del 1997, *The Pony Fish's Glow*, il biologo evoluzionista George Williams notò che «l'adattazionismo racconta più l'assenza dell'evoluzione che l'evoluzione stessa». Al centro delle sue ricostruzioni, infatti, più che il sorgere dei vari tratti ci sono i motivi per cui si mantengono nel tempo, le ragioni per cui non si evolvono più. Una volta apparsi postura bipede, grande cervello e pollice opponibile negli antenati dell'essere umano, perché sono rimasti? La selezione naturale preserva i caratteri impedendone la perdita. Nel descrivere questa procedura di correzione e ottimizzazione della selezione normalizzatrice, Williams scriveva: «La selezione naturale agisce soprattutto eliminando quello che si allontana dall'odierno sviluppo ottimale». Le descrizioni di animali selvatici e piante fatte da Aristotele 2500 anni fa sono ancora valide per i loro discendenti perché la selezione ne ha impedito l'evoluzione. Anche se Darwin era già andato oltre Williams, notando la stessa cosa per flora e fauna dell'antico Egitto, è a Williams che affidiamo la conclusione: «A un residuo relativamente piccolo di geni noi attribuiamo il vasto panorama dell'evoluzione». Ma basta davvero un modesto numero di geni a spiegare tanta parte dell'evoluzione?

A prescindere dall'importanza della selezione stabilizzatrice, resta il fatto che il cambiamento genetico è inarrestabile. L'affascinante ipotesi della «capacità evolutiva» suggerisce che gli organismi accumulino continuamente cambiamenti genetici senza che questo si rifletta in un'analogia crescita costante della variazione fenotipica, almeno finché non c'è un qualche fattore di disturbo del potenziale trasformativo accumulato. Esperimenti sui moscerini della frutta suggeriscono che certe proteine chiave che regolano complessi processi di sviluppo subiscono cambiamenti conformazionali nei periodi di stress ambientale, allentando il controllo, normalmente assai stretto, che esercitano sull'espressione dei geni; ciò potrebbe liberare un fiume di nuove varianti, in uno sprazzo di sperimentazione che va a punteggiare l'equilibrio statico. Ulteriori studi hanno rivelato

to che la maggior parte dei genomi sembra tenere sotto controllo le variazioni fenotipiche, fino a che queste proteine di regolazione, di norma affidabili, non sono compromesse dalla perdita delle corrette modalità di ripiegamento, il che consente alla variazione genetica, e quindi a decisive innovazioni, di emergere nella popolazione.

È dunque possibile che i fossili viventi siano semplicemente specie anomale le cui riserve nascoste di variazione fenotipica potenziale sono rimaste inutilizzate. D'altro canto, i fossili viventi potrebbero essere semplici eccezioni alla regola generale dell'estinzione. Non è chiaro quanto della loro longevità dipenda da fattori ecologici e non da fattori genetici. Certamente, da questi organismi possiamo trarre insegnamenti sul ruolo delle contingenze stocastiche nella storia evolutiva. In qualche caso, i rari sopravvissuti di linee di discendenza ritenute estinte in realtà prosperano quando sono introdotti in nuove aree. Questo fa pensare che la sopravvivenza di un fossile vivente può avere meno a che fare con le caratteristiche dell'organismo o del suo ambiente e più con la casualità di eventi storici come i disastri naturali o l'arrivo di nuovi predatori e concorrenti.

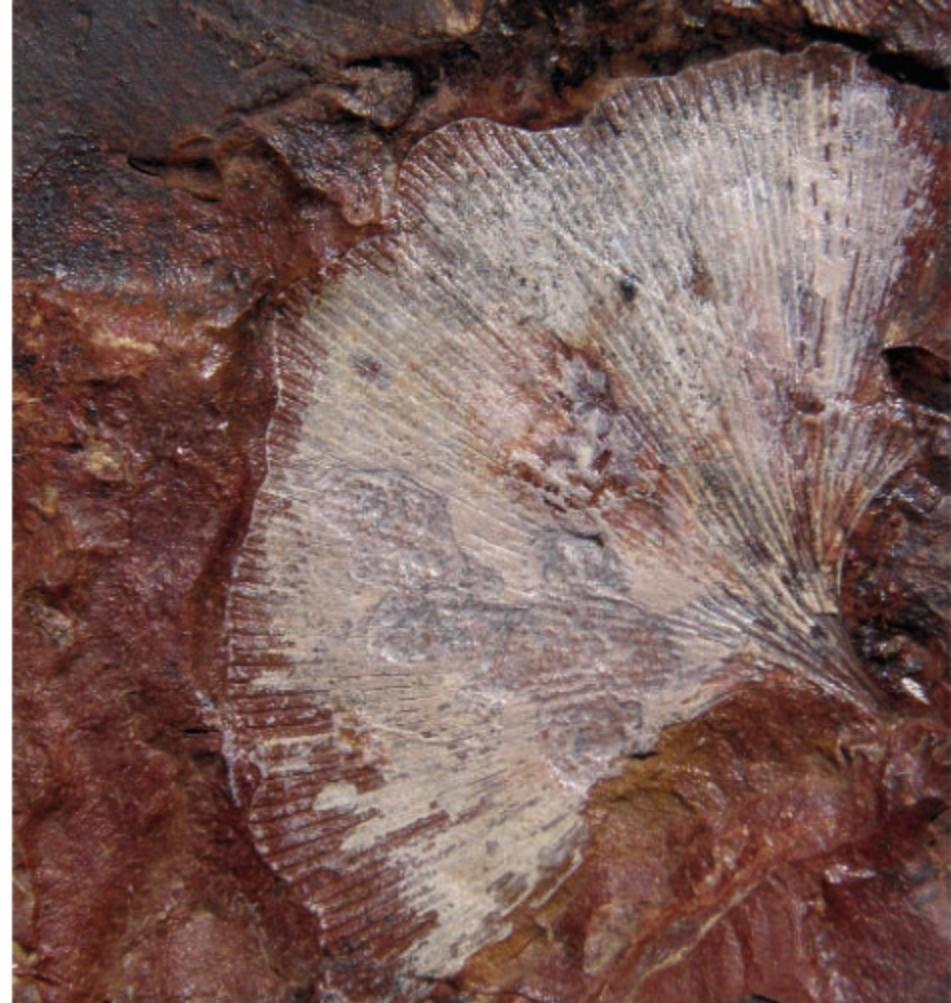
Partendo da alcuni episodi della storia del nostro pianeta, i paleontologi hanno concluso che le estinzioni di massa portano generalmente alla completa sostituzione di flora e fauna. Le ammoniti, molluschi dalla conchiglia a spirale simili all'attuale *Nautilus*, erano i predatori marini dominanti prima dell'avvento dei pesci ossei. Rettili simili ai mammiferi dominarono le terre emerse finché la loro estinzione portò all'ascesa dei dinosauri alla fine del Triassico, e dopo l'estinzione di questi ultimi alla fine del Cretaceo, la radiazione di mammiferi e uccelli portò all'occupazione di molte delle nicchie prima occupate dai dinosauri.

A prescindere dall'estinzione dei potenziali concorrenti, anche l'evoluzione di un nuovo tratto può rivelarsi un'innovazione chiave che apre la via per una radiazione adattativa. Per esempio, l'acquisizione di ragnatele con cui bloccare la preda ha scatenato l'enorme successo del gruppo dei ragni. Analogamente, l'acquisizione di simbionti interni che consenti ai detritivori di nutrirsi della vegetazione in decomposizione li ha portati a diffondersi e assumere un ruolo chiave in molti ecosistemi.

In economia si impiega il termine *wide moat* (letteralmente «fossato largo») per descrivere strategie imprenditoriali in cui un'azienda riesce ad acquisire e mantenere in via monopolistica una forte quota di mercato perché è la prima a imporre un certo prodotto prima che arrivi la concorrenza. Quando un nome commerciale diventa sinonimo di un prodotto (Xerox per le fotocopiatrici o Kleenex per i fazzoletti di carta), tipicamente viene da un'azienda che è stata almeno all'inizio identificata con certi beni o servizi. Questa situazione potrebbe essere analoga al modo in cui i fossili viventi tengono a distanza la concorrenza.

I biologi chiamano questo processo «esclusione competitiva»: gli organismi difendono le risorse e prevengono l'usurpazione della propria nicchia ecologica da parte di potenziali concorrenti grazie all'evoluzione di adattamenti con cui sfruttano certe risorse disponibili, spingendo le altre specie all'estinzione o verso nicchie diverse, in modo che non arrivino a poter ridurre la «quota di mercato» della prima specie che ha occupato quella nicchia. Forse i taxa fossili viventi non hanno affrontato troppe difficoltà «per aver vissuto», come disse Darwin «in una zona limitata, e quindi essere stati esposti a una competizione meno severa».

Come le aziende trincerate dietro un «fossato largo» offrono buone opportunità per gli investitori che cercano continuità di

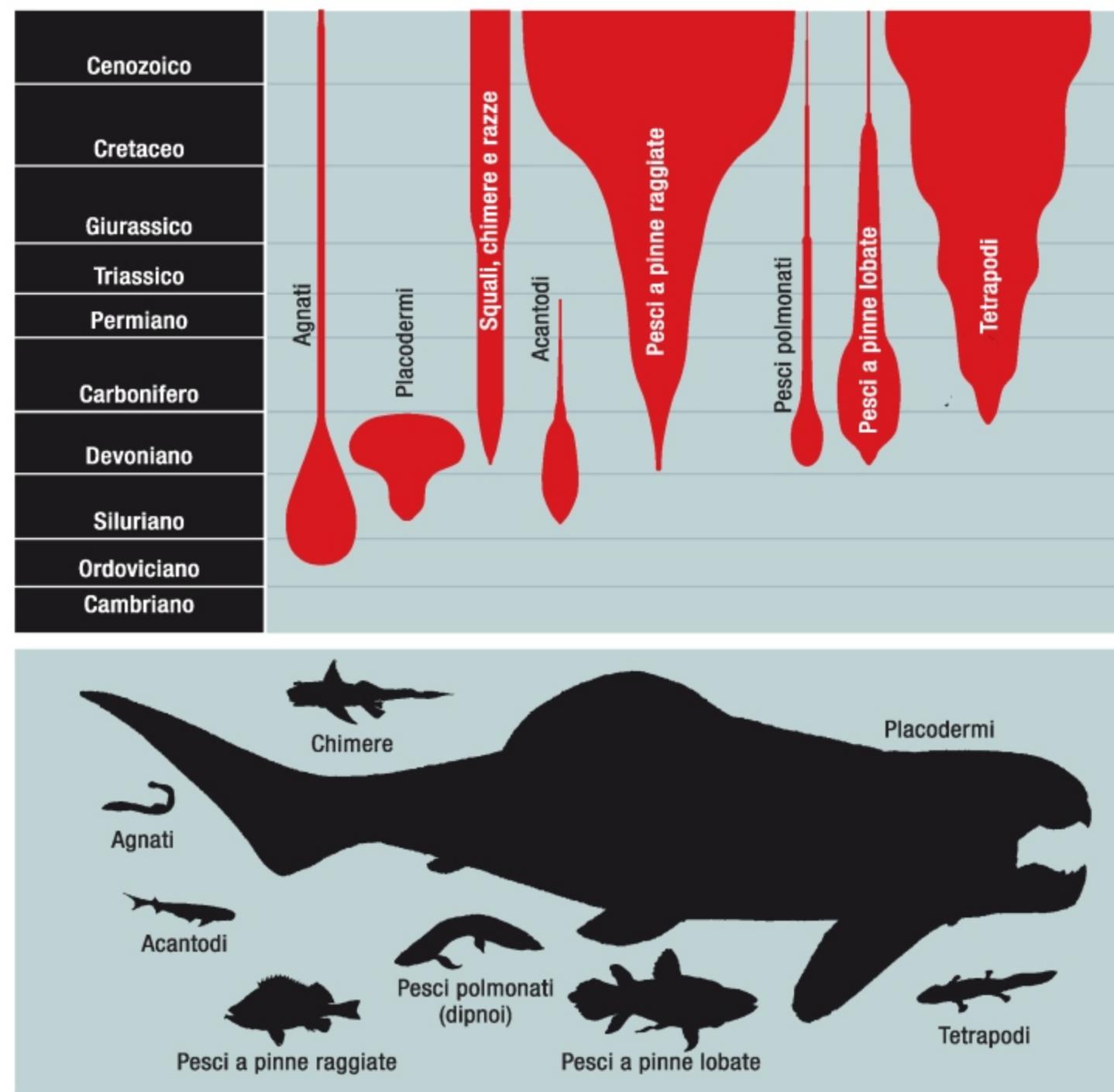


guadagni, anche i fossili viventi hanno avuto un buon ritorno a lungo termine. Due probabili spiegazioni, che riflettono anch'esse aspetti del mondo economico, potrebbero chiarire questo modo di dominare il «mercato» prevenendo la possibile concorrenza. Una è trovare precocemente una formula vincente; l'altra è vivere in un ambiente stabile e prevedibile con scarsa competizione per risorse che all'inizio potrebbero essere abbondanti. In una fase di stasi ecologica, la stasi morfologica potrebbe essere avvantaggiata, e le specie ben adattate hanno poco bisogno di cambiare se non c'è lo sprone dei cambiamenti ambientali, portando a una selezione stabilizzatrice più grande.

Dai tempi in cui ebbero origine molti dei piani corporei del regno animale, nel crogiolo dell'esplosione cambriana, il successo di tanti esperimenti evolutivi ha lasciato poco spazio a nuovi arrivi. Un economista potrebbe dire che sono già stati raccolti dal marciapiede tutti i biglietti di grosso taglio, o che sono stati colti tutti i frutti dei rami più bassi degli alberi. Alcuni biologi sostengono che i fossili viventi, in termini ecologici, sono prevalentemente generalisti e questo dà loro un vantaggio competitivo; altri affermano che sono tipicamente specialisti. Un esame delle specie fossili viventi offre conferme per l'una e per l'altra ipotesi. Le grandi innovazioni spingono le forme viventi verso la specializzazione, ma possono altrettanto bene aprire la via a tante nuove possibilità, e visto che i fossili viventi tendono a rappresentare linee di discendenza molto vecchie, l'innovazione potrebbe essere così antica – un occhio, un'ala, o l'architettura corporea dei vermi – da trovarsi ormai in molti organismi. Gli insetti, che tutti considera-

La figura superiore

indica le variazioni di abbondanza delle linee di discendenza dei pesci lungo i tempi geologici: la larghezza della linea indica il numero delle specie. Nelle linee di discendenza dei cosiddetti fossili viventi, come i dipnodi e i pesci a pinne lobate come i celacanti, c'è stata una riduzione del numero di specie. Non è chiaro se la loro durata sia spiegata dagli attributi della loro particolare linea di discendenza o dal caso.



Il ginkgo (*Ginkgo biloba*, a fronte, in basso) è, insieme al celacanto, uno dei più famosi fossili viventi ed è l'unica specie sopravvissuta della famiglia delle *Ginkgoaceae*, risalente al Mesozoico. I fossili più antichi attribuiti al genere *Ginkgo* (a fronte, in alto) sono stati datati a circa 250 milioni di anni fa.

no gli animali di maggior successo nella storia della Terra, possono essere considerati sia specializzati sia generalisti.

L'isolamento può essere un rifugio o una trappola. Nel suo libro del 1991 sui fossili viventi, Keith Stewart Thomson sosteneva che «sono riusciti a sopravvivere solo ritirandosi in qualche ambiente isolato, dove circostanze particolari consentono loro di resistere», e notava che se poi li si trasferisce in zone più vaste, in diretta competizione con altri organismi, è raro che abbiano successo. È chiaro che questa generalizzazione non è sempre vera. Ginkgo e metasequoia oggi crescono un po' in tutto il mondo. I dipnodi sono esibiti in molti acquari, e quelli africani sono noti per trascorrere l'estate dentro globi di fango che in condizioni di prolungata siccità si essiccano lentamente, permettendo loro di sopravvivere a condizioni proibitive che uccidono gli altri pesci. Questi esempi di adattabilità suggeriscono che non è stata solo la fortuna – essere sopravvissuti a un'estinzione catastrofica o essere entrati per primi in una nuova nicchia – ma spesso sono state anche innovazioni chiave a permettere ai fossili viventi di durare tanto a lungo.

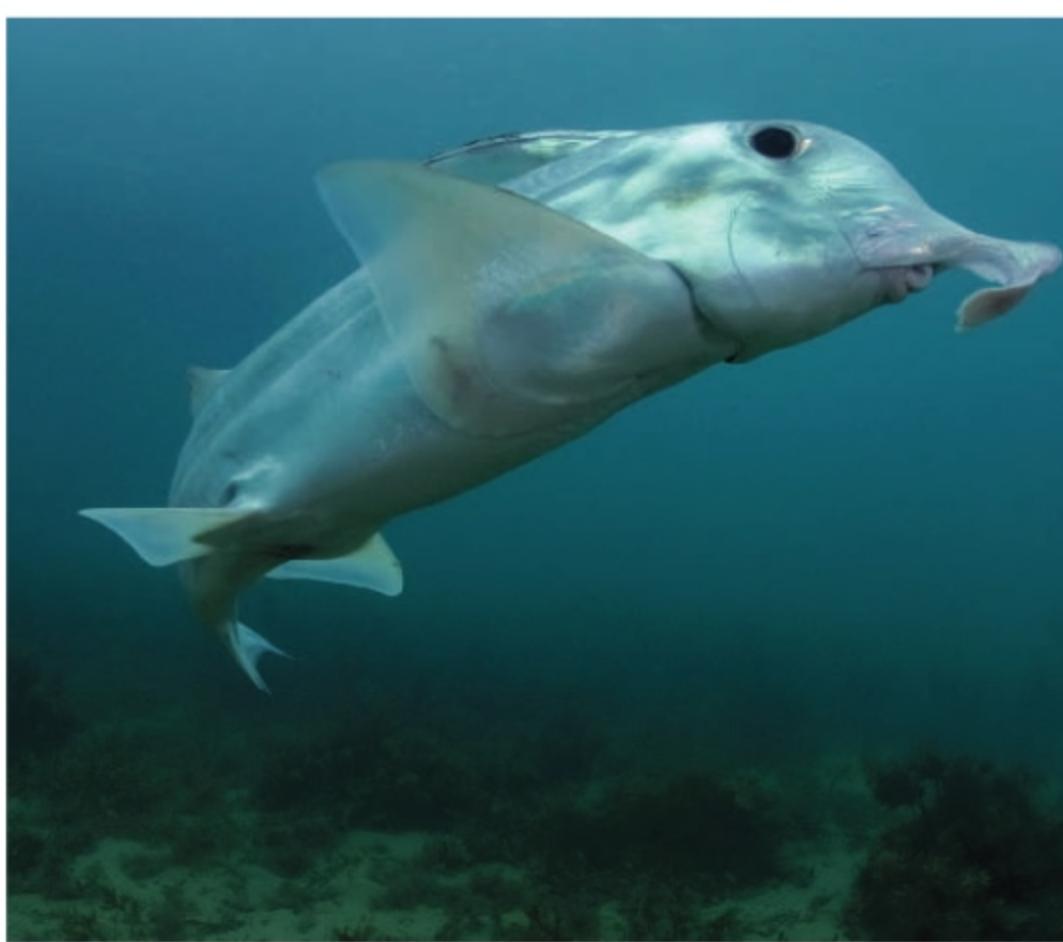
Definire le specie nel tempo

I fossili viventi ripropongono profonde questioni scientifiche e filosofiche sul concetto di specie, che può essere considerata come unità di classificazione, unità di selezione, o entrambe le cose insieme. Prima di Darwin, gli scienziati immaginavano che ogni specie fosse un tipo essenziale, una forma platonica ideale. Darwin mostrò invece che le specie non solo cambiano nel tempo ma mostrano anche una notevole misura di variazione interna, che

oggi chiamiamo polimorfismo, e riconobbe che questo non è un difetto ma un vantaggio, dato che costituisce un serbatoio di materia prima per l'evoluzione. I fossili viventi però sollevano questioni difficili. Anche se riconosciamo gli adattamenti micro-evolutivi all'interno del mutevole patrimonio genetico delle singole specie, è difficile dire quanto cambi una specie da una generazione alla successiva, e quando il cambiamento basta a varcare la linea che delimita una nuova specie.

È il problema filosofico del mutamento graduale che finisce per produrre cambiamenti importanti, come quando si vuol determinare a che punto l'acqua del bollitore smette di esser calda e diventa fredda, o quando un bambino crescendo da basso diventa alto. Lo stesso Darwin considerava il concetto di specie con scetticismo: «Vedo il termine specie come assegnato in modo arbitrario, a fini di convenienza, a una serie di individui che somigliano molto gli uni agli altri, e ritengo che non sia essenzialmente diverso da quello di varietà, riservato a forme meno distinte e più fluttuanti».

Come hanno da tempo osservato i biologi evoluzionistici, la mente umana, che è discontinua, vede rotture naturali in fenomeni che sono continui. Per dirlo con Richard Dawkins, i nomi che diamo alle specie in continuo mutamento «non sono più che una comoda finzione, una concessione ai nostri stessi limiti [...] Senza le lacune dell'archivio fossile, tutto il nostro sistema di nomenclatura delle specie crollerebbe». In questo senso, una specie può essere considerata un singolo fotogramma di un film, un'immagine nel tempo immortalata da un flash. Il concetto statico di specie funziona bene per ogni singolo istante del passato o del presente, ma non



Il tuatara (*Sphenodon Punctatus, sinistra*), rettile endemico della Nuova Zelanda, sembra non aver cambiato forma in 200 milioni di anni, a giudicare dalla sua forte somiglianza con gli antichi fossili. Tuttavia, recenti studi sul loro DNA hanno rivelato che i tuatara hanno uno dei più alti tassi di evoluzione molecolare di tutti i vertebrati. All'altro estremo, il callorinco (*Callorhinchus milii, destra*), anch'esso simile a forme fossili, ha il genoma a evoluzione più lenta e più conservato. Nota in precedenza solo attraverso fossili (*a fronte, sinistra*) risalenti al Mesozoico, la metasequoia (*Metasequoia glyptostroboides, a fronte, destra*) è stata formalmente scoperta nel 1943 nella Cina centro-orientale.

per le lunghe durate del tempo profondo. L'idea di specie mette il biologo di fronte a un problema difficile. Come sostiene Dawkins, «queste sono zone dell'evoluzione in cui le nostre convenzioni di nomenclatura zoologica non sono fatte per addentrarsi».

Grandi clamori hanno accolto nel 2009 l'annuncio che presentava il primate ancestrale *Darwinius masillae* come «il più antico antenato dell'uomo». Era un giochetto pubblicitario e un'assurdità: in senso stretto, l'antenato più antico dovrebbe essere la primissima forma di vita. *Darwinius* è noto da un unico fossile, in ottimo stato di conservazione, ma è vissuto quasi 50 milioni di anni prima della comparsa dell'essere umano. La stessa nozione di antenati e discendenti è scivolosa. Alcuni esperti di sistematica rifiutano la concezione progressiva, a scala, dell'evoluzione (l'evoluzione in linea diritta detta «anagenesi» o «ortogenesi»), in cui una specie si trasforma gradualmente in un'altra, che la sostituisce; essi sostengono invece che tutti gli eventi di speciazione avvengono mediante il processo di ramificazione detto «cladogenesi», chiamata così perché produce appunto ramificazioni dell'albero dell'evoluzione.

Il problema, quando si aggiunge l'asse del tempo al concetto di specie, è che degli antichi fossili conosciamo solo l'anatomia. Molto tempo fa, i biologi distinguevano le specie esclusivamente in base alla forma. Ma questo concetto morfologico di specie si è rivelato spinoso, fra l'altro perché alcune specie esibiscono polimorfismi tali da sembrare piuttosto un intero gruppo di specie diverse, e non una sola, mentre altre si somigliano al punto che può essere difficile distinguerle. Per fortuna, questo schema è stato superato nel 1942 dal concetto biologico di specie di Ernst Mayr, che distingue le specie in base all'impossibilità di incrociarsi con successo. Da questo universale isolamento riproduttivo, che può prendere forme diverse, dall'incompatibilità dei gameti alla differenza dei comportamenti riproduttivi, discende non solo l'incompatibilità riproduttiva ma anche una separazione netta, un chia-

ro confine che distingue le diverse specie provando che fra di esse non avvengono scambi di informazione genetica.

La distinzione, tuttavia, non è sempre di natura anatomica, e quindi evidente nella documentazione fossile, può essere ecologica, comportamentale, biogeografica, cellulare o molecolare. Il criterio di compatibilità riproduttiva di Mayr è quasi universalmente accettato perché funziona bene nel distinguere le specie viventi, ma si applica solo qui e ora. È un concetto orizzontale, basato sullo spazio, ma non applicabile sull'asse verticale del tempo, perché i patrimoni genetici antichi sono inaccessibili. Un'altra importante lezione che viene dai fossili viventi riguarda la natura selettiva e non neutra della documentazione fossile nota.

Una potenziale soluzione, seppure ugualmente problematica, potrebbe essere offerta dal concetto evolutivo di specie proposto da George G. Simpson, in cui una specie è definita come una linea di discendenza che si evolve separatamente dalle altre e ha tendenza e ruolo propri e distinti. Alcuni si rifanno a questa concezione per definire la specie come il più piccolo *taxon* (gruppo sistematico) che abbia avuto origine da un evento di scissione di una linea evolutiva. Sono concetti dubbi, perché è difficile chiarire che cosa si intenda per tendenza e ruolo evolutivi distinti. Altrettanto difficile è definire che cosa sia un evento di scissione di una linea evolutiva. Di certo, non tutte le popolazioni derivanti dalla divisione di una linea evolutiva sono equivalenti, e raggrupparle in un unico concetto di specie sarebbe fuorviante.

Un notevole punto di forza del concetto biologico di specie proposto da Mayr è che offre un criterio potenzialmente obiettivo per distinguere le specie: l'isolamento riproduttivo. E ci dà, elemento ancora più soddisfacente, una spiegazione del perché, tanto per cominciare, esistono le specie: sono popolazioni isolate, per quanto riguarda la riproduzione. L'isolamento riproduttivo protegge l'insieme di tratti grazie a cui una specie è adattata al suo parti-



colare ambiente. Ogni diluizione dell'informazione genetica con quella di un'altra specie non potrebbe che indebolire questi adattamenti e disturbarne l'integrazione. Così, ci ritroviamo al concetto di Mayr, a dispetto della sua natura unidimensionale e alle difficoltà nell'applicarlo a popolazioni che non si riproducono per via sessuale o in cui avvengono trasferimenti orizzontali di geni.

A complicare ancora la faccenda, la speciazione di rado è istantanea, come quando in una pianta autofertilizzante si origina una nuova specie per raddoppio del numero dei cromosomi. Nella maggior parte dei casi, l'isolamento riproduttivo si sviluppa gradualmente e nell'isolamento geografico. E possiamo stare certi che sia accaduto solo a posteriori, quando più popolazioni occupano la stessa area geografica ma non scambiano informazione genetica. Nei fatti, il numero di casi in cui l'isolamento riproduttivo tra specie è stato verificato direttamente è piccolo. Di solito, lo si deduce da distinzioni morfologiche, ecologiche e comportamentali. Molti studi recenti rivelano però che queste distinzioni possono anche non essere ovvie. Quella che appare una popolazione omogenea in termini morfologici ed ecologici può comprendere sottogruppi isolati dal punto di vista riproduttivo la cui presenza si nota solo quando si va a studiare il genoma.

Se le attuali teorie della speciazione sono esatte, e l'isolamento riproduttivo resta al centro del concetto di specie che domina in biologia, ogni tentativo di applicarlo nel tempo è futile. Se fossimo in grado di seguire all'indietro la genealogia del limulo, generazione per generazione, fino ai suoi antenati dell'Ordoviciano, non potremmo definire i punti in cui una specie è mutata unidirezionalmente in un'altra. Eppure possiamo essere sicuri che i limuli attuali sono isolati, in termini riproduttivi, dai loro antenati, malgrado siano legati a essi da un filo ininterrotto di relazioni genitore-figlio. Man mano che lo sguardo si spinge indietro nel tempo, le certezze del biologo si indeboliscono, e alla fine bisogna am-

mettere che non siamo più in grado di applicare alcun concetto di specie in maniera attendibile.

Anche se il tentativo di definire le specie nel tempo è irrealizzabile, non intendiamo negare la realtà della categoria di specie, e neppure sosteniamo l'idea darwiniana secondo cui specie e varietà sono semplici punti di riferimento in un continuo. Applicata senza riferimento alla dimensione temporale, la categoria di specie ha come minimo un valore euristico, perché riconosce la realtà ecologica e consente ai biologi di catalogare gli esseri viventi e quindi ci dà un sistema di classificazione in cui archiviare ogni e qualsiasi informazione relativa a ciascuna di queste popolazioni.

I taxa fossili viventi hanno molto da insegnarci su processi e prodotti dell'evoluzione, sottolineando i molti problemi del concetto di specie. Ma l'evoluzione è un processo in corso, non solo un fatto storico. Non documenta solo la cronologia della vita, ma spiega anche i meccanismi con cui innumerevoli specie, per miliardi di anni, sono emerse, sono cambiate e si sono estinte. Malgrado la loro apparente resistenza ai cambiamenti, i fossili viventi, come tutti gli organismi, attuali ed estinti, provano che l'evoluzione è la forza motrice dell'enorme diversità della vita sulla Terra, nel passato come nel presente. ■

PER APPROFONDIRE

Evolutionary Capacitance As a General Feature of Complex Gene Networks.
Bergman A. e Siegal M. L., in «Nature», Vol. 424, pp. 549-552, 31 luglio 2003.

Why Coelacanths Are Not Living Fossils: A Review Of the Molecular and Morphological Data. Casane D. e Laurenti P., in «Bioessays», Vol. 35, pp. 332-338, aprile 2013.

Rapid Molecular Evolution In a Living Fossil. Hay J. M., Subramanian S., Miller C. D. e Lambert D. M., in «Trends in Genetics», Vol. 24, pp. 106-109, marzo 2008.

Genome Sizes Through the Ages. Leitch I. J., in «Heredity», Vol. 99, pp. 121-122, agosto 2007.



Un po' più di memoria

Nuovi tipi di componenti elettronici, più simili a neuroni che a transistor, porteranno a un'elaborazione molto più veloce ed efficiente

di Massimiliano Di Ventra e Yurii V. Pershin

Per scrivere le parole che state leggendo abbiamo usato i migliori computer che la tecnologia può offrire oggi: macchine terribilmente lente e poco efficienti quando eseguono importanti calcoli scientifici. E questo è tipico di tutti i computer moderni, dallo *smartphone* che teniamo in mano ai supercomputer multi-miliardari che ronzano all'interno dei più avanzati centri di elaborazione.

IN BREVE

Tutti i computer attuali sono dotati di un'unità dedicata all'elaborazione computazionale e di un'unità di memoria separata che gestisce i programmi. Spostare le informazioni da una all'altra richiede molto tempo ed energia.

La memcomputazione, un nuovo approccio concettuale, opera come i neuroni nel cervello umano, le cui unità di elaborazione e di memoria sono fisicamente identiche. **Questo potrebbe rappresentare** un'enorme

passo in avanti in termini sia di velocità ed efficienza dei computer sia di nuove architetture computazionali. Gli scienziati hanno quindi iniziato a sperimentare i componenti della memcomputazione per capire come usarli al meglio.

Stavamo preparando un documento in Word, un programma che probabilmente usate anche voi. Per digitare «Per scrivere le parole che state leggendo» il nostro computer ha dovuto spostare una serie di 0 e di 1 – la rappresentazione che la macchina dà di un documento Word – da un'area di memoria temporanea e spedirla, attraverso un fascio di cavi, a un altro luogo fisico, l'unità di elaborazione centrale (*central processing unit*, CPU), che ha trasformato i dati nelle lettere che vediamo sullo schermo. Per far sì che quella particolare frase non scomparisse una volta spento il computer, i dati che la rappresentavano hanno dovuto viaggiare in direzione opposta, lungo lo stesso fascio di cavi, verso un'area di memoria più stabile, un disco rigido.

Questo movimento avanti e indietro avviene in due momenti distinti, ed è necessario perché attualmente la memoria di un computer non è in grado di eseguire elaborazioni e, allo stesso modo, i processori non sono in grado di immagazzinare dati di memoria. Si tratta di una divisione standard del lavoro presente anche nei migliori computer in grado di eseguire le più veloci elaborazioni in parallelo, con processori multipli. Purtroppo, il funzionamento di ognuno di questi processori è ancora ostacolato da questo limite.

Ora gli scienziati stanno sviluppando un modo per mettere insieme qualcosa che, fino a oggi, non è mai stato possibile: circuiti in grado di manipolare numeri e immagazzinare dati di memoria allo stesso tempo. Ciò significa sostituire i tradizionali elementi dei circuiti di un computer, come transistor, condensatori e induttori, con nuovi componenti: memristori, memcondensatori e meminduttori. Già oggi disponibili in forma sperimentale, questi componenti potrebbero essere presto integrati in un nuovo tipo di macchina: il memcomputer.

I memcomputer potrebbero dimostrare una velocità senza paragoni grazie alla loro doppia abilità: ciascuna loro parte può contribuire a trovare la risposta a un problema, in una versione nuova e più efficiente dell'attuale elaborazione in parallelo. Inoltre, dal momento che i problemi più complessi sono risolti dalla memoria del computer e immagazzinati direttamente in essa, queste macchine saranno in grado di risparmiare l'energia attualmente necessaria per spostare i dati all'interno del calcolatore.

Un'architettura informatica del genere, assolutamente innovativa, potrebbe modificare il modo con cui i computer operano, dai microscopici chip di un telefono ai giganteschi supercomputer. In effetti si tratta di una progettazione vicina al modo in cui opera il cervello umano, che mantiene i ricordi ed elabora le informazioni all'interno degli stessi neuroni. Queste nuove macchine per la memcomputazione potrebbero essere molto più veloci, impiegando solo pochi secondi per calcoli che richiederebbero decenni alle macchine attuali, sarebbero molto più piccole e userebbero assai meno elettricità. Un memcomputer non è ancora stato costruito, ma i nostri esperimenti sui singoli componenti indicano che l'impatto su progettazione dei computer, sostenibilità globale, uso di energia e capacità di risposta ai quesiti scientifici più importanti potrebbe essere enorme.

Un cervello elettronico ed efficiente

Per spostare dati come la nostra frase di Word all'interno di una macchina ci vuole pochissima elettricità e una frazione di secondo. Ma se pensiamo a che cosa succede moltiplicando l'energia per questo spostamento avanti e indietro per l'uso dei computer a livello globale, si tratta di un'operazione enorme.

Tra il 2011 e il 2013 il fabbisogno energetico per i centri di cal-

Massimiliano Di Ventra è professore al Dipartimento di fisica all'Università della California a San Diego.

Yuriy V. Pershin è professore associato al Dipartimento di fisica e astronomia all'Università del South Carolina.



colo di tutto il mondo è cresciuto di uno sbalorditivo 58 per cento. Non si tratta solo di supercomputer: aggiungiamo a questi tutti i diversi dispositivi domestici che oggi hanno qualche capacità di elaborazione, dai forni ai computer portatili, fino ai televisori. Tutti insieme, i settori dell'informazione e della comunicazione rappresentano oggi il 15 per cento circa del consumo globale di elettricità. Entro il 2030 il consumo di elettricità globale da parte delle apparecchiature elettroniche equivarrà al totale del consumo di elettricità residenziale degli Stati Uniti e del Giappone insieme, e costerà 200 miliardi di dollari ogni anno: uno scempio insostenibile di energia.

Non possiamo risolvere la situazione rimpicciolendo i transistor – l'elemento fondamentale dell'elettronica digitale – a dimensioni sempre più piccole: l'International Technology Roadmap for Semiconductors ha previsto che, con ogni probabilità, entro il 2016 l'industria dei transistor si scontrerà contro un muro tecnologico, perché i materiali per i componenti oggi disponibili non possono ridurre ulteriormente le proprie dimensioni mantenendo le stesse capacità.

Anche la ricerca impegnata nella risoluzione dei problemi più urgenti si scontrerà contro un muro: questioni di vitale importanza come le previsioni meteorologiche a livello globale o la previsione del verificarsi delle malattie in varie popolazioni tramite l'analisi delle grandi banche dati di genomica, affrontabili solo con immensi sistemi di calcolo, richiederanno una potenza di calcolo sempre più grande. Eliminando la necessità di trasferire ogni volta i dati dalla CPU alla memoria, un processo che richiede tempo e potenza, i memcomputer potrebbero far risparmiare una significativa quantità di energia.

Chiaramente, non si tratta del primo dispositivo di elaborazione dell'informazione che gestisce calcoli e memoria nello stesso spazio fisico. Il cervello umano fa esattamente la stessa cosa, e la memcomputazione trae spunto da questo organo veloce ed efficiente che si trova sulle nostre spalle.

Secondo diverse stime, un cervello umano medio è in grado di eseguire circa 10 milioni di miliardi di operazioni al secondo, usando solo da 10 a 25 watt nel processo: per eseguire la stessa mole di lavoro, un supercomputer impiegherebbe una quantità di energia 10 milioni di volte superiore. Un computer, inoltre, non si avvicina nemmeno alla raffinatezza di compiti complessi come il riconoscimento di *pattern* – per esempio distinguere un cane che abbaia dal rumore di un'automobile che passa per strada – che noi sappiamo realizzare in un ambiente rumoroso e imprevedibile come quello in cui viviamo. Diversamente dai nostri supercomputer attuali, i calcoli del cervello non sono eseguiti in due luoghi fisici

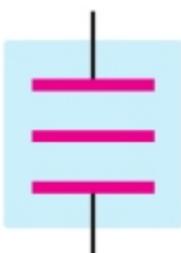
I tre mattoncini del memcomputer

I moderni circuiti elettrici usano tre componenti che rispondono ai segnali elettrici: i resistori, in grado di ostacolare il passaggio della corrente elettrica che scorre attraverso di essi; i condensatori, che immagazzinano le cariche elettriche; e gli induttori, che convertono la corrente in un campo magnetico. In genere in un computer i transistor sono usati al posto dei resistori. Quando il circuito è spento, i componenti ritornano al proprio stato originario. I memcomponenti, invece, conservano il proprio stato modificato, e questa «memoria» permette la rapida esecuzione delle elaborazioni numeriche. (Le linee rosse all'interno dei simboli rappresentano i diversi effetti a livello elettrico.)



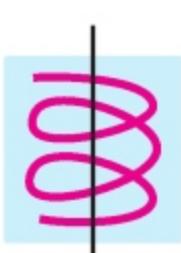
Memristore

Questo dispositivo modifica la propria resistenza a seconda della quantità di corrente che lo attraversa, e mantiene questa forma modificata: in questo modo è in grado di elaborare l'informazione e conservarla, come una memoria.



Memcondensatore

Questo dispositivo non solo immagazzina le cariche elettriche, ma modifica anche il proprio stato, o capacità, in funzione della tensione applicata in precedenza. Di nuovo, questo dota il memcondensatore di capacità di memoria e di elaborazione. L'eventuale energia non usata può essere riciclata per altre operazioni computazionali, risparmiando energia.



Meminduttore

Come un memristore, questo dispositivo permette il passaggio della corrente, ma è anche in grado di immagazzinare l'energia, come un memcondensatore. La combinazione di flusso di corrente e immagazzinamento fa sì che i meminduttori elaborino l'informazione e la immagazzinino come un componente di memoria del computer.

to, immaginiamo un tubo che modifica il proprio diametro a seconda della direzione in cui l'acqua vi scorre all'interno. Quando il flusso viaggia da destra a sinistra il tubo si restringe, e al suo interno scorre una quantità minore di acqua. Se si interrompe il flusso, il tubo mantiene l'ultimo diametro acquisito, ovvero «ricorda» la quantità di acqua che lo ha attraversato.

Sostituiamo ora l'acqua con la corrente elettrica e il tubo con un memristore. Il memristore modifica il proprio stato a seconda della quantità di corrente che lo attraversa, proprio come il tubo modifica il proprio diametro: un tubo più ampio mostra una resistenza elettrica minore, mentre uno più stretto ha una resistenza maggiore. Se pensiamo alla capacità di resistenza come a un numero e alla variazione della resistenza come a un processo di elaborazione, un memristore è un elemento di un circuito in grado di elaborare l'informazione e di preservarla all'interrompersi della corrente. I memristori combinano il lavoro di un'unità di elaborazione con quello della memoria in un unico luogo fisico.

L'idea di un memristore risale agli anni settanta, e si deve a Leon O. Chua, ingegnere elettrico all'Università della California a Berkeley. Al tempo la teoria non sembrava realizzabile in pratica: i materiali usati per costruire i circuiti non erano in grado di mantenere la memoria del loro ultimo stato, come l'immaginario tubo dell'acqua, e per questo motivo l'idea sembrava impossibile da realizzare. Nel corso dei decenni, però, ingegneri e scienziati dei materiali sono stati in grado di esercitare un controllo sempre maggiore sui materiali dei circuiti da loro costruiti, dotandoli di nuove proprietà. Nel 2008, Stanley Williams, ingegnere di Hewlett-Packard, ha messo a punto con i suoi colleghi componenti di memoria in grado di modificare la propria resistenza e preservare questo stato modificato.

Plasmando il diossido di titanio, i ricercatori hanno costruito componenti elettrici di ampiezza pari a poche decine di nanometri (un miliardesimo di metro). In un articolo pubblicato su «Nature», gli scienziati hanno dimostrato che il componente manteneva lo stato determinato dalla storia prossima della corrente che lo aveva attraversato. Il tubo immaginario era divenuto reale.

Si è scoperto che questi dispositivi possono essere fabbricati con un'ampia gamma di materiali e che possono essere realizzati con un'ampiezza di pochi nanometri. Dimensioni inferiori implicano la possibilità di organizzarne un numero maggiore in una data area, in modo che sia possibile stiparli in praticamente qualunque tipo di apparecchiatura. Gran parte di questi componenti possono essere fabbricati negli stessi laboratori di semiconduttori che realizzano gli attuali componenti dei computer, e ciò significa che una produzione su scala industriale è possibile.

Un altro componente chiave potenzialmente utile alla memcomputazione è il memcondensatore. I condensatori standard sono dispositivi in grado di immagazzinare le cariche elettriche, ma che non modificano il proprio stato o la propria capacità in funzione del numero di cariche in essi depositate. Nei computer, questi dispositivi trovano il loro principale impiego nelle memo-

distinti, ma avvengono negli stessi neuroni e nelle stesse sinapsi. Un minor numero di spostamenti implica un minor dispendio di energia e meno tempo perso nello spostamento delle informazioni. Un computer è in grado di eseguire calcoli, uno per volta, più velocemente di quanto sappiano fare gli esseri umani, ma c'è bisogno di tutta la forza bruta di un transistor per eseguirli.

Tradizionalmente, i computer si basano su questa caratteristica separazione dei poteri per evitare che i programmi e i dati da essi creati interferiscano tra loro durante l'elaborazione. I cambiamenti in un circuito causati da dati nuovi – per esempio le lettere digitate in Word – cambiamo e corrompono il programma stesso. Questo si potrebbe evitare se gli elementi del circuito di un processore fossero in grado di «ricordare» l'ultima cosa fatta, anche dopo l'interruzione della corrente. I dati continuerebbero a rimanere intatti.

Tre parti di una nuova macchina

I componenti alla base della memcomputazione sono in grado di fare esattamente questo: elaborare l'informazione e immagazzinarla dopo l'interruzione della corrente elettrica. Uno di questi nuovi dispositivi è il memristore. Per capire il suo funzionamen-

rie ad accesso casuale dinamico (*dynamic random access memory*, DRAM), un particolare tipo di memoria che mantiene i programmi del computer in uno stato di disponibilità in modo che possano essere caricati velocemente nel processore quando è richiesto. Un memcondensatore, al contrario, non solo immagazzina le cariche ma modifica anche la propria capacità a seconda del voltaggio precedentemente applicato, dotandolo di una capacità sia di memoria sia di elaborazione. Inoltre, dal momento che un memcondensatore immagazzina le cariche, ovvero energia, questa potenza può essere usata nuovamente durante i processi computazionali, contribuendo a minimizzare i consumi dell'intera macchina (al contrario, i memristori usano tutta l'energia fornita loro).

Alcuni tipi di memcondensatori, realizzati con materiali ferro-elettrici relativamente costosi, sono già disponibili sul mercato e usati come dispositivi per l'immagazzinamento dei dati. I laboratori di ricerca, però, stanno sviluppando versioni in silicio, più economico, mantenendo il costo di manifattura sufficientemente basso affinché i memcondensatori possano essere impiegati in tutto un computer.

Il meminduttore è il terzo elemento della memcomputazione. È dotato di due terminali, e può immagazzinare l'energia come un memcondensatore, permettendo allo stesso tempo il passaggio di corrente come un memristore. Anche i meminduttori sono già disponibili, ma hanno dimensioni relativamente grandi, dato che impiegano grosse bobine di filo magnetico, cosa che rende difficile il loro impiego in un piccolo computer. I progressi nel campo dei materiali potrebbero però cambiare questa situazione nel prossimo futuro, proprio come è avvenuto solo pochi anni fa per i memristori.

Dal 2010 il nostro gruppo cerca di dimostrare che la memcomputazione può gestire i processi computazionali meglio rispetto all'attuale architettura informatica. Uno dei problemi su cui ci siamo concentrati è la risoluzione di un labirinto. Da tempo la programmazione di software per la soluzione dei labirinti è un banco di prova per valutare l'efficacia di un hardware. Gli algoritmi convenzionali esplorano il percorso per piccoli passi consecutivi. Per esempio, uno degli algoritmi più conosciuti è il cosiddetto *wall follower*: il programma traccia il muro del labirinto seguendo ogni sua svolta e curva, evitando gli spazi vuoti dove il muro si interrompe, e si muove, calcolo dopo calcolo, faticosamente dall'ingresso all'uscita. Questo approccio indicato come «passo-dopo-passo» (*step-by-step*) è lento.

La memcomputazione, come abbiamo dimostrato in simulazioni, può risolvere questo problema in modo estremamente veloce. Consideriamo una rete di memristori, ciascuno collocato a ogni curva del labirinto, tutti in uno stato di alta resistenza. Se applichiamo un singolo impulso elettrico che attraversa il punto di entrata e di uscita, la corrente passerà solo lungo il percorso risolutivo, dato che sarà bloccata dai punti senza uscita lungo gli altri percorsi. Il passaggio della corrente modifica le resistenze dei corrispondenti memristori. Una volta scomparso l'impulso, la soluzione del labirinto sarà immagazzinata solo nel valore della resistenza di quei dispositivi che hanno cambiato il proprio stato. Abbiamo quindi calcolato e immagazzinato la soluzione in un colpo solo. Tutti i memristori calcolano la soluzione in parallelo, contemporaneamente.

Questo tipo di elaborazione è diversa delle versioni attuali di computazione parallela. Oggi, in una macchina che lavora in parallelo si ha in genere una grande quantità di processori che elaborano parti di un programma e che in seguito comunicano tra

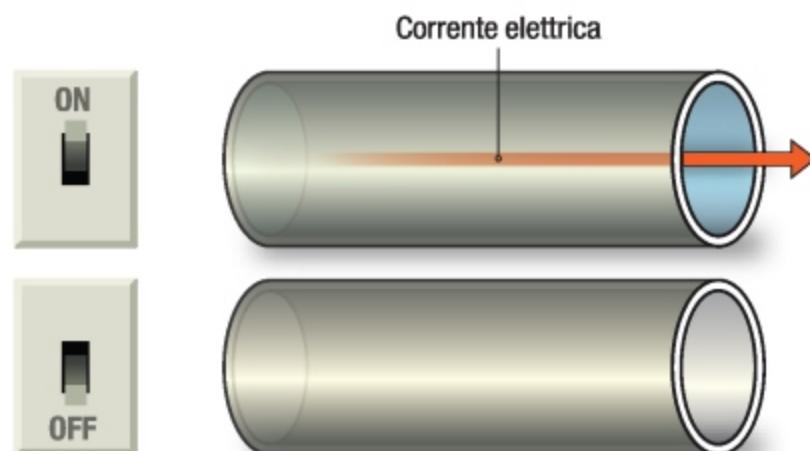
COME FUNZIONANO I MEMRISTORI

La forza della memoria

Uno dei nuovi componenti della memcomputazione, il memristore, risponde in modi diversi a livelli diversi di corrente elettrica. Ecco tre di questi cambiamenti che, se mantenuti, formano le basi della memoria.

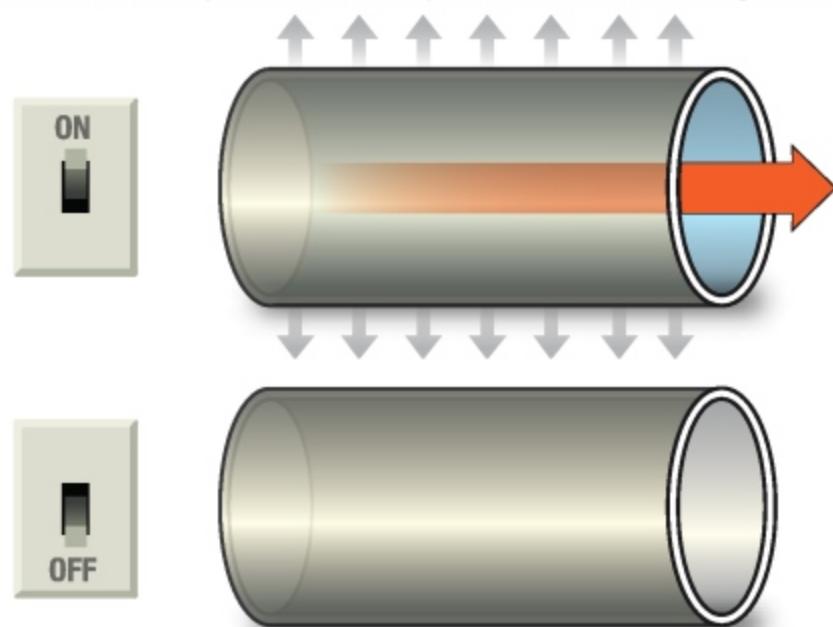
Resistenza tipica

Quando una corrente elettrica debole attraversa un memristore, il dispositivo ha un livello di resistenza, qui mostrato come ampiezza del tubo. In un computer la resistenza è interpretata come un numero, che porta a un calcolo. Togliendo la corrente, l'ampiezza è conservata.



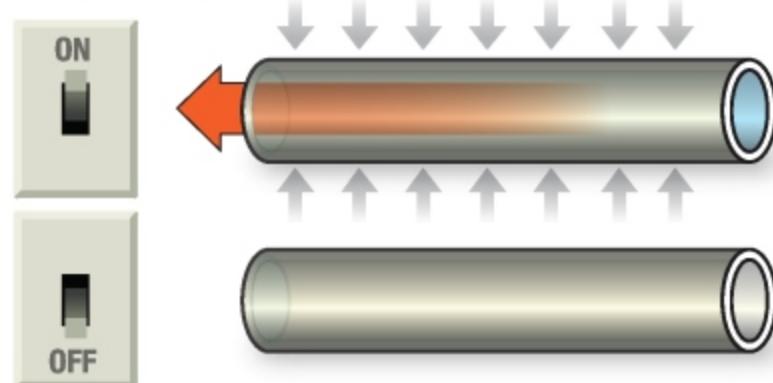
Bassa resistenza

Con una corrente intensa, il memristore diminuisce la resistenza (tubo più ampio). Il cambiamento, interpretato come un numero diverso rispetto alla configurazione originaria, permette di processare l'informazione. Senza corrente, il memristore conserva lo stato e funziona come memoria. Nel computer attuali, il componente torna allo stato originario.



Alta resistenza (inversione di corrente)

I memristori possono aumentare la resistenza se la corrente è invertita (tubo di minore ampiezza). Togliendo la corrente, il tubo non ritorna allo stato originario, aggiungendo memoria alla sue funzioni di elaborazione.



loro per elaborare a una risposta finale. Questo richiede ancora una grande quantità di energia e di tempo per trasferire l'informazione tra tutti questi processori e le loro unità di memoria associate (ma fisicamente distinte). Nel nostro schema di memcomputazione, ciò non è necessario.

La memcomputazione mostra un reale vantaggio quando la applichiamo a uno dei più complessi problemi dell'informatica: il calcolo di tutte le proprietà di una grande serie di numeri interi, il tipo di sfida che un computer deve affrontare quando tenta di decifrare codici complessi. Per esempio, ipotizziamo di dare 100 numeri interi a un computer e di chiedergli di trovare almeno un sottoinsieme la cui somma sia pari a zero. Il computer dovrà analizzare tutti i sottoinsiemi possibili e sommare tutti i numeri in ciascuno di essi. Analizzerebbe ciascuna combinazione possibile, una per una, ovvero un aumento esponenzialmente immenso del tempo di elaborazione: posto che l'elaborazione di 10 numeri interi richiede 1 secondo, 100 numeri interi richiederebbero 10^{27} secondi, ovvero milioni di triliardi di anni.

Come nel caso del problema del labirinto, un memcomputer è in grado di calcolare tutti i sottoinsiemi e sommarli in un'unica fase, in maniera realmente parallela, perché non deve spostare i dati tra uno o più processori, in sequenza. L'approccio a passo singolo (*single-step*) richiederebbe un solo secondo.

Nonostante questi vantaggi e nonostante il fatto che i componenti siano già stati realizzati in laboratorio, i chip di memcomputazione non sono ancora disponibili sul mercato. Al momento sono in fase di valutazione le prime versioni nel contesto dei laboratori accademici e per opera di alcuni produttori per stabilire se questa progettazione innovativa sia sufficientemente robusta, rispetto a un uso ripetuto, per sostituire gli attuali chip di memoria costituiti da transistor e condensatori standard, ovvero il tipo di chip che troviamo nei drive USB e nei drive di memoria a stato solido. È possibile che questi test richiedano parecchio tempo, perché i componenti devono poter durare anni senza cedimenti.

Pensiamo che alcuni progetti di memcomputazione potranno essere pronti nei prossimi anni. Nel 2013, assieme a Fabio Lorenzo Traversa e Fabrizio Bonani, ricercatori presso il Politecnico di Torino, abbiamo proposto un'idea chiamata memoria ad accesso casuale per la computazione dinamica (*dynamic computing random-access memory*, DCRAM). L'obiettivo è sostituire il tipo standard di memoria che, come abbiamo detto, si usa per tenere i programmi appena prima che il processore ne faccia richiesta. In questo tipo di memoria convenzionale ciascun bit di informazione che costituisce il programma è rappresentato da una carica immagazzinata su un unico condensatore, cosa che richiede un numero elevato di condensatori per rappresentare un programma.

Sostituendoli con memcondensatori, le diverse operazioni logiche necessarie al programma potrebbero essere rappresentate da un numero significativamente inferiore di memcondensatori nella stessa area di memoria. I memcondensatori sono in grado di passare da un'operazione logica a un'altra in maniera quasi istantanea applicandovi una tensione diversa. L'elaborazione di istruzioni come «do *x* AND *y*», «do *x* OR *y*» ed «ELSE do *z*» può essere gestita da due soli memcondensatori, invece che da un gran numero di condensatori normali. Non è necessario modificare l'ar-

chitettura fisica di base per eseguire funzioni diverse. In terminologia informatica, questo è chiamato polimorfismo, ovvero la capacità di un elemento di eseguire operazioni diverse in funzione del tipo di segnale in ingresso. Il nostro cervello ha questo tipo di polimorfismo: non abbiamo bisogno di modificarne l'architettura per eseguire compiti diversi, tuttavia le nostre macchine attuali ne sono prive, dato che i circuiti dei loro processori sono fissi. Grazie alla memcomputazione, inoltre, poiché questa elaborazione si realizza all'interno dell'area di memoria, lo spostamento rispetto ai diversi processori, che implica un dispendio di tempo ed energia, viene meno, e il risultato delle elaborazioni computazionali può essere immagazzinato nello stesso punto.

Questi sistemi sono effettivamente realizzabili con i mezzi oggi a nostra disposizione, non richiedendo alcun significativo passo avanti in termini di tecnologia. Tuttavia, la necessità di progettare nuovi programmi per il loro controllo potrebbe essere d'intralcio. Non sappiamo ancora quale sia il tipo di sistema operativo più efficiente per la gestione di queste nuove macchine: dovremo costruire le macchine, testare e ottimizzare vari tipi di sistemi di control-

lo, ovvero dovremo seguire lo stesso percorso già seguito dagli ingegneri informatici che hanno realizzato l'attuale generazione di calcolatori.

Gli scienziati vorrebbero inoltre definire il modo migliore per integrare questi nuovi elementi nei computer di oggi. Potrebbe essere comodo continuare a usare i processori attuali per compiti semplici – l'elaborazione della frase in Word all'inizio di questo articolo, per esempio – e dedicare gli elementi di memcomputazione all'interno della stessa macchina per operazioni più complesse che richiedono un maggior dispendio di tempo. Dovremo costruire, valutare, ricostruire e rivalutare.

In futuro, questa tecnologia potrebbe portare a dispositivi di piccole dimensioni in grado di elaborare problemi molto complessi

Ci piace tuttavia provare a immaginare fin dove questa tecnologia ci potrebbe portare. Dopo la fase di realizzazione e di valutazione, gli utenti potrebbero ritrovarsi con un dispositivo di piccole dimensioni, forse addirittura da stare sul palmo di una mano, in grado di elaborare problemi molto complessi come, per esempio, il riconoscimento di schemi ricorsivi o i modelli del clima globale ad alta risoluzione. Qualcosa che potrebbero fare in uno o pochi passi di calcolo, con un dispendio di energia, e quindi di costi, molto contenuto.

Non vi mettereste anche voi in fila per comprare uno? ■

PER APPROFONDIRE

Putting Memory into Circuit Elements: Memristors, Memcapacitors, and Meminductors. Di Ventra M., Pershin Y.V. E Chua L.O., in «Proceedings of the IEEE», Vol. 97, n. 8, pp. 1371-1372, agosto 2009.

Experimental Demonstration of Associative Memory with Memristive Neural Networks. Pershin Y.V. e Di Ventra M., in «Neural Networks», Vol. 23, n. 7, pp. 881-886, settembre 2010.

Solving Mazes with Memristors: A Massively Parallel Approach. Pershin Y.V. e Di Ventra M., «Physical Review E», Vol. 84, n. 4, articolo n. 046703, 14 ottobre 2011.

The Parallel Approach. Pershin Y.V. e Di Ventra M., in «Nature Physics», Vol. 9, pp. 200-202, aprile 2013.

Dynamic Computing Random Access Memory. Traversa F.L. e altri, in «Nanotechnology», Vol. 25, n. 28, articolo n. 285201, luglio 2014.

Missing Link of Electronics Discovered: Memristor. Minkel J.R., ScientificAmerican.com, 1° maggio 2008, <http://www.scientificamerican.com/article/missing-link-of-electronics/>.

Microchip dei prossimi 20 anni. Autori vari, in «Le Scienze» n. 499, marzo 2010.

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Ninfe al bivio

L’ importante era bloccarlo prima che aprisse bocca. L’umano e il felino dissimulano calma, ma in verità controllano avidamente ogni vibrazione dell’uscio, attendendo il momento fatidico.

Le feline (e ben più sensibili) orecchie della gatta Gaetanagnesi percepiscono il tenue scatto del cancello all’ingresso: una rotazione di pochi minuti d’arco del collo e una quasi impercettibile oscillazione delle vibrisse sono il gesto convenuto. Il compare, interpretando il segnale, si avvicina alla porta con la *nonchalance* propria di un bullo di quartiere. Restano pochi istanti all’apertura dell’uscio: l’azione doveva essere immediata e brutale.

«Oh, era ora! Ad aspettare te si fa in tempo a morire. Qua, dammi i pacchetti. Se dobbiamo metterli in frigo, meglio farlo subito, o potremmo ritrovarci cosce di pollo senzienti per casa, e non vorrei dover convivere con un ulteriore complesso di inferiorità...».

Mentre parla, il loquacissimo Doc guida Rudy verso la cucina. Una volta qui, perfino la gatta sembra respirare con maggiore tranquillità. In compenso, l’ultimo arrivato è del tutto stupefatto.

«Ti ringrazio sentitamente, Doc, anche se a trasportare mezz’etto di tabacco da pipa dovrei ancora farcela da solo... Ma perché dovrei metterlo in frigo?».

«Sai che mi importa del tuo tabacco – sospira Piotr con affanno – per me puoi anche usarlo come shampoo antiforfora. L’importante era farti stare zitto, ed evitare il tuo squillante “Come va?” diretto ad Alice».

«Ma se è il minimo sindacale, dal punto di vista dei saluti! E non è solo per Alice: mi interessa sapere come va la vita di tutti...».

«Ecco, in questo ameno giorno, te lo dico io come va: Alice è presa da un suo affare importante e privato, e non ha voglia di parlarne con nessuno. Ciò nonostante ha già ricevuto, almeno una cinquantina di solerti interventi che cominciavano tutti con “Io, nei tuoi panni...”».

«Lo capisco. Alice è molto popolare, ha un sacco di amici che vogliono aiutarla».

«No che non capisci: se c’è una cosa che Treccia odia sono gli aiuti non richiesti. Ormai è così furiosa che il tuo “Come va?” sarebbe stato interpretato come indebita intromissione nelle sue ambasce, e avrebbe generato un “Fatti i fattacci tuoi” declinato in via di turpiloquio e accompagnato dal lancio di suppellettili sul tuo prezioso cranio».

«Ah. Suppongo che debba ringraziarvi, allora: grazie, Doc; grazie, micia. E voi come vi siete salvati, piuttosto?».

«Restando zitti e diventando invisibili, ovviamente. Se ti piacciono gli spettacoli forti, aspetta che arrivi il prossimo buon samaritano in vena di consigli per la nostra adorabile virago».

Lo sguardo di Rudy sopra le spalle di Doc e la sua rapida occhiata fanno intuire che la virago è entrata in cucina.

«Che cosa confabulate? Rudy, non provare nemmeno a mettere il tabacco nel frigorifero».

In certi casi, la miglior difesa è l’attacco: «A parte il fatto che non ne ho la minima intenzione, sappi che quando sentirò la ne-



cessità di avere consigli in merito sarà mia cura richiederteli». Chi di spada ferisce... Rudy prende al balzo il breve sospiro e l’accento di quiete: «Sembri stanca, non sarà mica che ti ci vuole una birra?».

«Beh... Sì, forse riuscirà a calmarmi. Una non può avere un dilemma da risolvere senza che il resto del mondo non si senta in dovere di pontificare in merito. C’è stato un momento in cui avrei volentieri preso tutti a sganassoni. A parte Doc e Gaetanagnesi, a dire il vero, che si sono comportati bene».

«Beh, la pulsione al mutuo soccorso è frequente tra gli umani (e tra i felini: scusa, micia). E spesso è intensa al punto da non assicurarsi se gli altri vogliono davvero ricevere aiuto, e tantomeno il fatto di essere abissalmente ignoranti e incompetenti sul problema. Ma c’è di peggio: c’è anche chi, fingendo di aiutare, mira invece solo al tornaconto personale. Per fortuna questi sono quasi sempre riconoscibili, e allora basta fare l’esatto contrario di quel

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di maggio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.



La ricerca della strada per arrivare a un'ipotetica birra è un problema degno dei classici greci e della mente di Rudy

IL PROBLEMA DI MARZO

Il mese scorso eravamo alle prese con tre aiuole circolari mutuamente tangenti, e si chiedeva di trovare il raggio di un quarto cerchio tangente a tutti e tre i cerchi dati. Il problema era (volutamente) un po' indefinito, perché non si chiariva se il cerchio dovesse essere tangente esternamente o internamente, e neppure se dei tre cerchi dati qualcuno fosse tangente internamente a uno degli altri. Fortunatamente, in tutti questi ca-

si la soluzione è la medesima: se anziché i raggi usiamo i loro reciproci, ossia i raggi di curvatura, abbiamo: $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = (a + b + c + d)^2/2$. La formula è stata trovata dal chimico Frederick Soddy, l'inventore del termine isotopo, e messa in versi da H.S.M. Coxeter:

*Four circles to the kissing come
The smaller are the benter
The bend is just the inverse of*

*The distance from the centre
Though their intrigue left Euclid dumb
There's now no need for rule of thumb
Since zero bend's a dead straight line
And concave bends have minus sign
The sum of the squares of all four bends
Is half the square of their sum.*

Vi daremmo la traduzione, ma come al solito il margine è troppo piccolo...



che consigliano: un oracolo totalmente ingannatore è affidabile quanto un onesto oracolo infallibile».

«Già... Come se chiedessi a Doc, di fronte a due porzioni di dolce, di indicarmi e darmi quella più grande, no?».

«Hai compreso alla perfezione. Era proprio l'esempio che avevo in mente: in un caso del genere, non devi neanche fare lo sforzo di controllare le dimensioni, basta prendere quella che non indica lui».

«Ho sempre pensato che i problemi logici popolati da individui che dicono sempre il vero o sempre il falso fossero un mero artificio logico, ma in alcuni casi specifici (come quello che implica Piotr e la ripartizione dei dolci), hanno forse un'attinenza col mondo reale...».

«Certo! A suo tempo abbiamo ambientato qualche problema prefigurando un perfetto bugiardo e un perfetto veritiero nelle vicinanze di un villaggio dove si distribuiva gratuitamente la bir-

ra. Di fronte a un incentivo abbastanza forte, come il desiderio di bersi più birra possibile, per gente come noi, ritrovarsi di fronte bugiardi perfetti (e, se non altro per ragioni di simmetria, dei perfetti veritieri) non è cosa fuori dal mondo; e chiedere indicazioni a persone simili comporterebbe proprio i rischi che caratterizzano questi problemi di logica. Ma resta il fatto che questa tipologia di problemi trascura quella numerosa genia che ti ha ammalorato la giornata: quelli che, pur non sapendo nulla, cercano ugualmente di darti un consiglio».

«Li odio. Sono inutili, anzi dannosi...».

«Non si può mai dire. Pensaci: se mentre cerchi di raggiungere la mescita della birra, oltre al solito bugiardo e veritiero, trovassi anche un terzo personaggio che non conosce la strada giusta ma che sappia riconoscere chi mente e chi no, potrebbe esserti d'aiuto, una volta sentito quanto dicono gli altri due».

«Concesso. Ma solo a patto che questo terzo tizio dica la verità, sennò sono da capo a quindici...».

«In realtà, anche in questo caso... Senti, tagliamo la testa al toro, anzi al Minotauro, e affidiamoci ai classici – fa Rudy, sfilando un libro dallo scaffale – ecco: immagina di essere giunta a un trivio...».

«Il solito triviale. Non bastava un bivio?».

«Hmpf. Tre strade possibili, e solo una è quella giusta. All'incrocio ci sono dieci fanciulle: tu sai che cinque ti diranno la verità e cinque ti diranno il falso, ma solo cinque sanno quale sia la strada per il villaggio. Tu naturalmente non sai chi mente o no, chi è informata o meno, ma tra loro si conoscono bene, e tutte sentono bene che cosa dicono le precedenti».

«E dicono...?».

«Anfitrite: prendi la strada a sinistra. Cimotoe: prendi la strada a destra. Doto: non prendere la strada in mezzo. Eucrante: prendi la strada a destra. Ferusa: non prendere la strada a destra. Galena: prendi la strada in mezzo. Ippotoe: non prendere la strada a sinistra. Liagora: prendi la strada a sinistra. Melita: prendi la strada in mezzo. Nemerte: non prendere la strada a sinistra».

«Doc, che cosa hai da ridere? Hai già trovato la soluzione?».

«Meglio, Treccia. Ho trovato che fine ha fatto la mia copia del Kerenyi. Capo, spiega: dove sarebbero, allora, le altre 40 Nereidi?».

«Che domande Doc... Chi credi che stia mescendo la birra, al villaggio?».

A ciascuno il suo tempo

Il tempo

di Stefan Klein

Bollati Boringhieri, Torino, 2015, pp. 304 (euro 22,00)

Trattiamo i nostri giorni come se fossero articoli confezionati, mentre probabilmente potremmo anche permetterci un vestito su misura». Perché, sebbene mai come oggi siamo stati così svincolati dalle costrizioni sia della natura sia della società, non ci siamo ancora abituati e non ci fidiamo della nuova libertà. Così continuiamo a sentire il tempo come un tiranno, senza renderci conto che il suo ritmo si genera dentro di noi.

Stefan Klein, fisico tedesco diventato scrittore, ce lo racconta in un coinvolgente viaggio in tre tappe fra le tante dimensioni del concetto di tempo e i nostri modi di percepirllo, spaziando da Einstein a Hitchcock a Goethe, tra ricerca scientifica e filosofia, medicina, letteratura, cultura popolare. La prima tappa, «Vivere il tempo», è la più lunga. Analizza l'orologio biologico che scandisce i nostri ritmi interni, i meccanismi della memoria, e la curiosa abitudine della nostra mente di saltare di continuo dal passato al futuro trascurando il presente. Quando lo psicologo statunitense Leonard Giambra invitava i volontari a cimentarsi per mezz'ora in un compito, e ogni tanto chiedeva loro a bruciapelo se fossero concentrati o stessero pensando ad altro, tutti, che stessero risolvendo un puzzle o leggendo Tolstoj, restavano stupefatti da quanto spesso la loro mente fosse altrove: scoprirsi concentrati era l'eccezione.

Ancora, Klein ragiona su come mai a volte sentiamo il tempo volare e altre volte trascinarsi con penosa lentezza, di solito all'opposto di quanto ci piacerebbe, come rimarcava Einstein: «Quando si è stati due ore con una ragazza carina si ha la sensazione che siano trascorsi due minuti; se si sta seduti per due minuti su un forno molto caldo, si ha la sensazione che siano due ore». E sottolinea i guai di una società che ancora vede in positivo l'essere allodole, che carburano presto al mattino, e su queste tara i suoi ritmi a scapito dei gufi che danno il meglio più avanti nella giornata, nonostante lavori e stili di vita permetterebbero ormai molta più flessibilità.

La seconda parte, «Sfruttare il tempo», racconta gli effetti dell'invenzione dell'orologio, la fretta che sembra attanagliare le nostre società, gli errori che facciamo nel gestire il tempo e i veri motivi per cui, nonostante vite sempre più lunghe e ricche di ore libere grazie anche ai tanti strumenti che liberano il nostro tempo, ci sentiamo così spesso senza fiato. Una sensazione in verità non così nuova, se la lamentava già Goethe.

In realtà «le radici del problema non sono la scarsità di tempo e un ritmo più veloce imposto dall'esterno, bensì tre fattori che scaturiscono dalla nostra vita interiore»: mancanza di concentrazione (per eccesso di stimoli), mancanza di reale motivazione (nonostante quanto dichiariamo, se c'è da scegliere preferiamo per lo più dedicarci a guadagnare e a tenerci impegnati anziché al tempo libero) e stress («non è vero che siamo stressati perché non abbiamo tempo: non abbiamo tempo perché siamo stressati»). Come

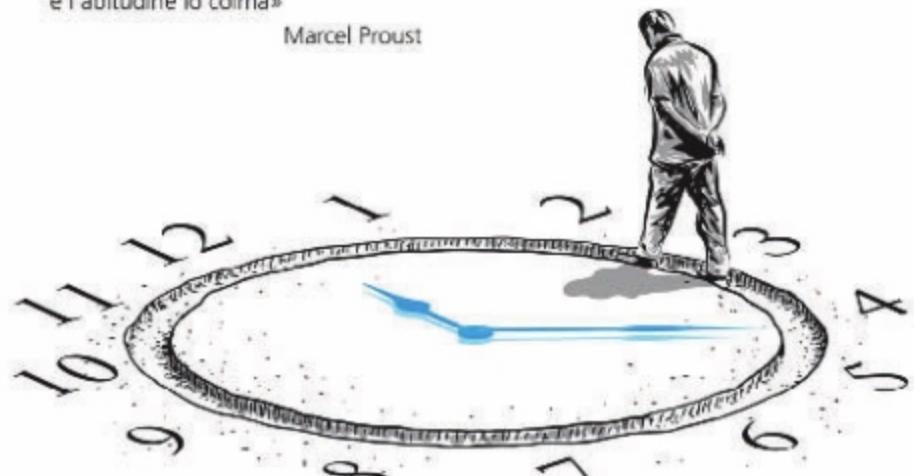


Stefan Klein

IL TEMPO LA SOSTANZA DI CUI È FATTA LA VITA

«Il tempo di cui disponiamo ogni giorno è elastico, le passioni che proviamo lo dilatano, quelle che ispiriamo lo restringono e l'abitudine lo colma»

Marcel Proust



Bollati Boringhieri

sconfiggere questi tre «ladri del nostro tempo» è il tema di altrettanti capitoli.

La terza tappa, «Che cos'è il tempo», traccia una breve panoramica del concetto fisico di tempo, spaziando dal big bang a Newton e alla relatività. L'epilogo tira infine le fila prospettando «una nuova cultura del tempo». Gli accorgimenti individuali aiutano, ma fino a un certo punto: anche i ritmi della società devono cambiare. Pur senza rincorrere l'utopia apparente di Diaspar, la città immortale tratteggiata dallo scrittore Arthur Clarke, che si è liberata dal dominio del tempo ma perdendo per strada anche tutte le sensazioni profonde che vi sono inevitabilmente legate, dall'amore al cordoglio. Klein propone invece sei passi, a livello individuale e sociale, per recuperare la sovranità sui propri momenti e fare davvero del tempo un vestito su misura.

«Una nuova cultura del tempo non potrà rinunciare al calendario e agli orologi. Essa non ne sarà però più ossessionata. [...] Invece di fissare un ritmo del tempo per tutti, la nuova cultura del tempo riconosce che ogni essere umano ha un ritmo proprio, e lo usa. È necessario percepire e rispettare questo tempo interno, poiché esso è la sostanza di cui è fatta la vita».

Giovanni Sabato

Come cambiò la medicina ai tempi della Marsigliese



Medicina e rivoluzione
di Giorgio Cosmacini
Raffaello Cortina, Milano, 2015
pp. 390 (euro 29,00)

I decenni intorno alla Rivoluzione francese del 1789 sono stati fecondi per la medicina. Nuove idee vengono messe in campo per comprendere e gestire i fenomeni patologici. Si fondano istituti, si rinnovano gli ospedali, si applicano terapie innovative. Questo libro passa in rassegna (purtroppo, con il supporto di una bibliografia un po' datata) i principali protagonisti del passaggio dall'*Ancien régime* alla nuova società giacobina, fino alla restaurazione post-napoleonica. Si parte, naturalmente, dall'*Encyclopédie* illuminista, il monumento al sapere e alla «nuova ragione» che avrebbe dovuto guidare il rinnovamento della società, per arrivare alle conseguenze sul lungo periodo delle modernizzazioni proposte dai medici francesi nel periodo più turbolento per la società transalpina. Un periodo in cui la medicina ha avuto un ruolo di primo piano: le nuove Ecoles de Santé che andavano a sostituire le paludate facoltà mediche, lo sviluppo della medicina e chirurgia militare (in un paese che affrontò quasi due decenni consecutivi di guerre) e scoperte importanti sul fronte degli strumenti (come lo stetoscopio) hanno influenzato il rapporto tra cittadini, società e medicina. Anche la ghigliottina, simbolo della Rivoluzione, fu il frutto della ricerca medica e politica di un modo «pietoso» – immediato e indolore – di uccidere i condannati. Alla sequenza di ritratti di medici fa seguito una breve sezione di commento sull'eredità nell'Italia contemporanea, dove spesso si è cercato di allontanare qualsiasi pretesa di una medicina «democratica» e al servizio della società. Proprio questa parte è forse quella di maggior interesse del volume, restituendo al lettore uno dei possibili significati della ricerca storica.

Mauro Capocci

Strategie per il clima, tra paradossi e minacce



La politica del cambiamento climatico
di Anthony Giddens
Il Saggiatore, Milano, 2015,
pp. 288 (euro 20,00)

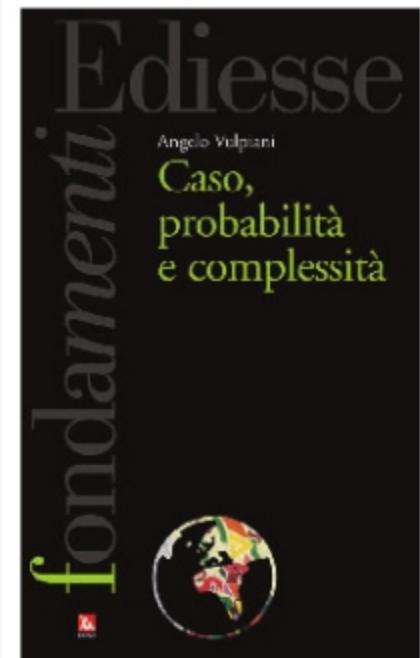
È una minaccia concreta, attuale, presente, e vale per l'intera umanità. La conosciamo tutti e ormai non la nega più (quasi) nessuno. Eppure non facciamo nulla per evitarla, cioè per ridurre e scansare i danni da cambiamento climatico. È il paradosso che il sociologo Anthony Giddens, ex direttore della London School of Economics e attualmente membro laburista della Camera dei Lord britannica, ha con una certa immodestia intitolato a se stesso. Ed è proprio il «paradosso di Giddens» la chiave di lettura di *La politica del cambiamento climatico*, uscito per i tipi del Saggiatore: un saggio corposo e documentato in cui si possono trovare, punto per punto, tutti i termini della questione. Per uscire dal paradosso e cominciare a fare qualcosa di utile.

La tesi principale di Giddens è che non si tratta di salvare il pianeta, che sopravvive benissimo anche senza di noi. Ma di salvare l'umanità. Quindi di farlo attraverso scienza, tecnologia, politica, e soprattutto attraverso la forte consapevolezza che non si può affrontare il problema senza occuparsi anche delle questioni di sicurezza energetica. È per questo, spiega Giddens, che le politiche ambientali europee non stanno facendo progressi, perché si è rinunciato a parlare con una voce sola sulle questioni dell'energia. Per Giddens, inoltre, non si può avallare un'impostazione del tipo «ritorno al passato»: non solo non funziona, ma potrebbe persino danneggiare la ricerca di soluzioni al riscaldamento globale. Mentre la soluzione deve essere tutta nello Stato, senza etichette di destra o di sinistra: Stato che deve cominciare a pianificare, vincendo l'irresistibile e umana tentazione a considerare il futuro sempre meno urgente del presente.

Silvia Bencivelli

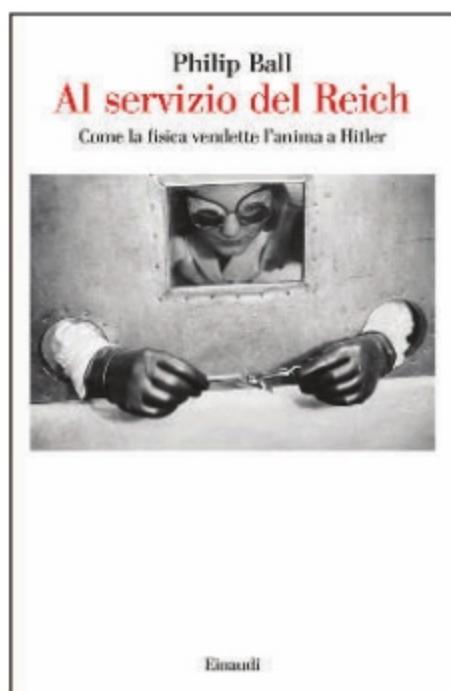
Ritratto senza veli della probabilità

Questo libro è utile per quel vostro amico che gioca spesso al Lotto in tutte le sue varianti. Oppure per quella vostra amica fissata con l'omeopatia. O magari anche per voi che ogni volta li guardate con sguardo esterrefatto, chiedendovi come sia possibile che i vostri amici non colgano l'assurdità delle loro passioni e convinzioni. Basterebbe saperne un po' di più riguardo a *Caso, probabilità e complessità*, co-



me recita il titolo del libro (pp. 224, euro 12,00, Ediesse, Roma, 2014) di Angelo Vulpiani, professore di fisica teorica della «Sapienza» Università di Roma.

L'impostazione narrativa è quella del dialogo tra personaggi storici (per esempio Ipazia, Boltzmann, Mach) o finti. Nel primo capitolo sono affrontati i concetti base della teoria della probabilità, grazie a cui nei capitoli successivi l'autore ci guida alla scoperta di meccanica statistica, caos e complessità. Possono sembrare argomenti lontani dalla vita reale, ma il passaggio sulla finanza e quelli che affrontano, tra gli altri, l'omeopatia e il Lotto dei vostri amici di cui sopra, riportano tutto alla realtà di tutti i giorni. Quella in cui esistono tante sfumature di grigio, non il bianco e il nero. (gs)



Al servizio del Reich

di Philip Ball

Einaudi, Torino, 2015,
pp. 292 (euro 32,00)

Fisica e scelte morali sotto il Terzo Reich

Nel 1933 gli studenti di Berlino bruciarono le opere «degenerate» di autori ebrei come Sigmund Freud, Stefan Zweig e Walter Benjamin. Secondo alcune fonti, nel rogo furono gettati anche i lavori di Albert Einstein, la cui relatività era ritenuta un «complotto giudaico». È uno dei simboli dell'odio razziale che il Reich nazista cercò di inoculare come un virus nella comunità scientifica tedesca, epurata della componente ebraica, per costruire di una «scienza ariana». Per descrivere il clima di quegli anni, il giornalista Philip Ball sceglie le storie di Max Planck, Peter Debye e Werner Heisenberg e la domanda principale che si pone è come sia possibile che scienziati di grande intelligenza potessero tollerare il regime senza reagire apertamente.

Ball parte da un'analisi del 1947 dello storico H. B. Gisevius, il quale scriveva che il disastro tedesco evidenzia «la facilità con cui le persone possono farsi risucchiare nel pantano dell'inazione; basta che, come individui, si lascino prendere dal sentirsi più furbi degli altri, dall'opportunisto o dalla codardia, e sono tutti irrimediabilmente perduti». Ma Ball non si fa trascinare sulla strada della semplificazione, che porterebbe a individuare Planck, che rimase alla presidenza dell'Accademia tedesca delle scienze sotto il Reich, come l'ignavo, Debye, che ad-

dirittura era olandese, come lo scaltro opportunista ed Heisenberg come l'arrogante che si sentiva superiore ai gerarchi nazisti. Il merito principale del racconto di Ball è restituire la complessità e la contraddittorietà delle motivazioni e dei sentimenti che muovono gli uomini. Debye, per esempio, aiutò Lise Meitner a fuggire dalla Germania, ma rimase a capo del suo istituto fino al 1940. Le domande diventano ancora più difficili pensando che alcuni dei fuoriusciti ebrei non esitarono a usare le proprie conoscenze per costruire le bombe atomiche statunitensi, mentre Heisenberg e altri scienziati tedeschi si trinceravano dietro alla tesi per cui avrebbero rallentato i progressi nucleari nazisti rimanendo ai loro posti. Guardare al passato senza essere condizionati da quello che oggi sappiamo è difficile, ancora di più dare giudizi. Ball rischia quando descrive come un eroe Paul Rosbaud, che fece la spia per conto degli inglesi. Ma in generale la sua ricostruzione pone questioni sul rapporto tra scienza e società che anticipano il «peccato» della fisica con Hiroshima e Nagasaki; questioni che mostrano come l'idea che lo scienziato sia lontano dalla politica e si occupi solo della scienza era priva di fondamento allora come oggi.

Marco Boscolo



Spaghetti robot

di Riccardo Oldani
Codice, Torino, 2015,
pp. 204 (euro 15,00)

Quei bravi robot che parlano italiano

Quando si parla di made in Italy, inevitabilmente si citano i marchi di alta moda, i prodotti alimentari DOP o le produzioni artigianali locali. Raramente si ricorda che anche sul fronte tecnologico abbiamo eccellenze da vantare. Per esempio nel campo della robotica, come ci fa capire bene Riccardo Oldani in questo libro che è frutto di dieci anni di visite nei laboratori e centri di ricerca italiani in cui prendono vita forme diverse di intelligenza artificiale.

Insieme al Giappone, siamo stati pionieri nella concezione e realizzazione di robot, come testimonia il fatto che la nostra industria automobilistica è seconda solo a quella del giapponese per densità di automazione. Il robottino umanoide iCub dell'Istituto italiano di tecnologia è il simbolo ormai universalmente noto di una comunità scientifica variegata e molto attiva che ha prodotto frutti importanti. La mano robotica Lifehand2 è un raffinato esempio di integrazione uomo-macchina, l'isoscheletro Body Extender apre nuove prospettive al campo della riabilitazione, ed entrambi sono stati sviluppati alla Scuola superiore Sant'Anna di Pisa. L'Università di Parma ha realizzato un sistema per veicoli a guida autonoma ben prima della Google Car. Il Consiglio nazionale delle ricerche ha ideato un impianto automatizzato per il disassemblaggio dei rifiuti elettronici, all'Università di Genova è nato un ro-

bot talpa per operare nelle discariche. E poi c'è il variegato mondo dei droni, ideali per il monitoraggio del territorio o per portare soccorso in aree disastrate. Entrare in questi laboratori significa aprire una finestra sul prossimo futuro. I robot stanno entrando massicciamente nelle fabbriche e nelle aziende. Ci ruberanno il lavoro? Le professioni a rischio sono molte, e non si tratta solo di operai, ma anche di figure come l'autista, il commercialista, l'agente immobiliare. Oldani ci aiuta a inquadrare meglio i termini della questione, navigando tra allarmismi ed entusiasmi tecnofili.

Intanto i sistemi di intelligenza artificiale sono prossimi a entrare nelle nostre case. E non solo per spazzare la polvere. A Peccioli, in provincia di Pisa, si allenano in una casa-laboratorio alcuni robot progettati per assisterci e interagire con noi in molte attività quotidiane, dallo smaltimento dei rifiuti alla gestione delle nostre agende. L'impressione è che ci siano ormai tutte le premesse per una nuova rivoluzione tecnologica, con importanti implicazioni sociali ed etiche. E l'immaginario un po' pigro dei robot da film di fantascienza che prendono il sopravvento sui poveri esseri umani è troppo povero per aiutarci a intravedere che aspetto avrà il nostro futuro.

Marco Motta

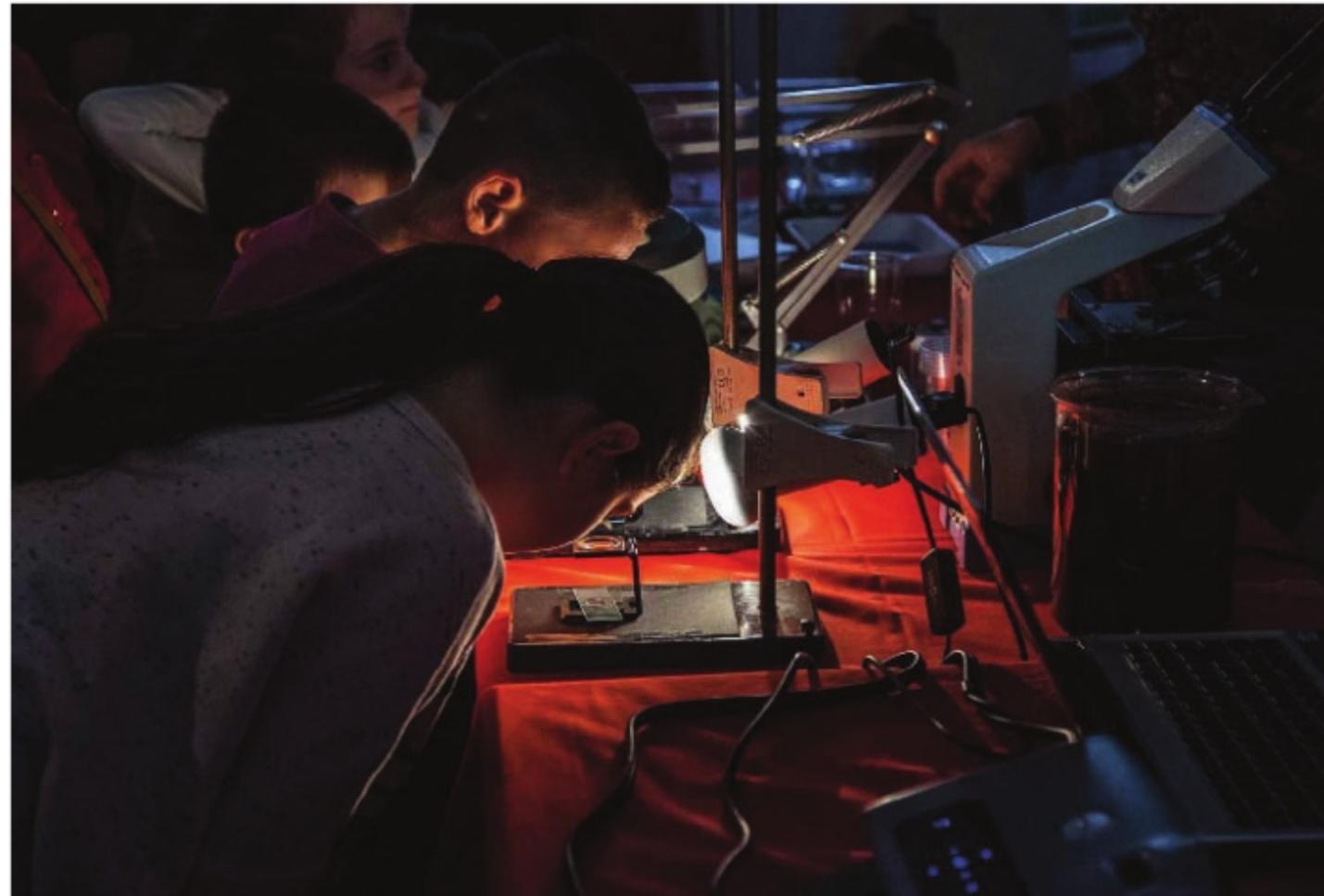
Plasmare il futuro con i saperi

La scienza come strumento per capire come sta cambiando il mondo è il filo conduttore della nuova edizione della Festa di Scienza e di Filosofia di Foligno

“**M**i interessa molto il futuro: è lì che passerò il resto della mia vita» è una citazione che viene attribuita a diversi personaggi, tra cui il comico Groucho Marx e l'inventore Charles Kettering, direttore della ricerca di General Motors tra il 1920 e il 1947. Con tutti i limiti della battuta di spirito, la frase coglie un aspetto ineluttabile del futuro: è determinato dal presente. E in questo presente gli strumenti in mano alla scienza sono i più potenti che abbiamo a disposizione per capire come sta cambiando e cambierà il mondo in cui viviamo, dagli aspetti della produzione industriale a come ci spostiamo, da come e cosa mangiamo ai mezzi per comunicare, dalle cure che la medicina ci mette a disposizione alle cose che possiamo e potremo comperare.

È a questo incrocio che è dedicata la quinta edizione della Festa di Scienza e di Filosofia organizzata da Laboratorio di scienze sperimentali e comune di Foligno. La città umbra ospita oltre 70 relatori che nell'arco di quattro giornate esploreranno altrettanti aspetti del futuro: il vero e il falso nella comunicazione della scienza, il rapporto tra cervello e mente, la «divisione» tra le due culture (umanistica e scientifica) e il ruolo della scienza nella costruzione di un futuro pacifico.

Dal programma, si segnalano gli interventi di Lucia Votano sulla ricerca dei neutrini nei Laboratori INFN del Gran Sasso, di Roberto Battiston sull'esplorazione spaziale e di Guido Barbujani sulle radici di *Homo sapiens*. Ancora, l'esplorazione delle componenti del rischio spiegata da Simona Morini, il contributo pacifista di Albert Einstein raccontato da Pietro Greco e il «dialogo tra un umanista e uno scienziato» con Tullio



De Mauro e Carlo Bernardini. *Che cos'è la verità* è il titolo della conferenza di Piergiorgio Odifreddi, mentre Giulio Giorello parlerà della scienza come modello di cultura democratica e Maria Chiara Carrozza dei rapporti tra scienza e politica in Italia. E, come è tradizione della manifestazione, oltre ai grandi nomi e agli intellettuali più famosi, in programma ci sono anche ricercatori, insegnanti e giornalisti che questi futuri stanno contribuendo a costruirli e raccontarli.

Accanto al programma principale, non mancano laboratori e attività per i giovani, come il progetto degli Ambasciatori della Festa, che coinvolge nella gestione dell'evento ragazzi delle scuole secondarie e studenti universitari.

Marco Boscolo

Arrivata con successo

alla sua quinta edizione, la festa vede in prima linea tra gli organizzatori il Laboratorio di scienze sperimentali di Foligno, un'aggiornatissima struttura di ricerca e didattica della scienza, che nelle sue oltre 12 aule specializzate (sopra) ospita attività didattiche, di ricerca scientifica e tecnologica e di sperimentazione e sviluppo a livello locale e nazionale.



Foligno
9 • 12 Aprile 2015
Scienza e Futuro

Dove & quando:

V Festa di Scienza e di Filosofia
Virtute e Canoscenza
dal 9 al 12 aprile
www.festascienzafilosofia.it

di Paolo Attivissimo

Giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media



Cloni umani e scienziati superstar

La parola del ricercatore sudcoreano che aveva annunciato la clonazione umana

Dieci anni fa, Hwang Woo-suk era uno dei ricercatori di spicco nel campo della clonazione umana. Considerato un eroe nazionale in patria, la Corea del Sud, aveva finanziamenti ingenti per il proprio laboratorio. Il governo sudcoreano, ansioso di promuovere il paese come culla di tecnologie di avanguardia, aveva conferito a Hwang Woo-suk il titolo surreale di Scienziato Supremo ed emesso francobolli dedicati alla sua persona. Korean Air lo ospitava gratuitamente in prima classe sui voli per qualunque destinazione.

C'erano buone ragioni per questo trattamento da superstar. Già nel 2004, dalle pagine prestigiose di «Science», Hwang Woo-suk aveva annunciato, primo al mondo, di aver clonato con successo un embrione umano e di averne ottenuto cellule staminali: una sfida tecnica ritenuta quasi impossibile ma immensamente promettente per la terapia di malattie come il morbo di Parkinson e il morbo di Alzheimer. A maggio 2005 Hwang aveva bissato il trionfo pubblicando, sempre su «Science», l'annuncio della creazione di ben undici linee di cellule staminali da embrioni umani clonati, aprendo così la porta a terapie su misura per singoli pazienti. Ad agosto dello stesso anno aveva anche presentato Snuppy, il primo cane clonato.

Ma pochi mesi dopo si scoprì che gli articoli inviati a «Science» contenevano dati accuratamente falsificati ed erano state commesse gravi violazioni etiche nelle ricerche descritte. Hwang Woo-suk ne era direttamente responsabile e aveva mentito per coprire i sospetti dei colleghi: cadde in disgrazia, e lo scandalo fu definito «una macchia inamovibile sull'intera comunità scientifica e sul nostro paese» dal presidente della Seoul National University, dove Hwang Woo-suk aveva effettuato la sperimentazione. «Science» ritirò gli articoli: di autentico rimase soltanto il cane.

Oggi la macchia è invece assai sbiadita: Hwang Woo-suk è stato processato e condannato per appropriazione indebita di fondi di ricerca e ha chiesto profondamente scusa e questo è bastato ai suoi sostenitori privati e governativi, che gli hanno finanziato una fondazione di ricerca dove ha clonato oltre 400 cani, principalmente per clienti privati facoltosi degli Stati Uniti che possono permettersi di spendere 100.000 dollari a testa. La fonda-

zione ha pubblicato oltre 40 articoli che descrivono successi incrementali nelle tecniche di clonazione animale.

È facile interpretare questa vicenda come un fallimento umiliante della *peer review*, il procedimento di revisione degli articoli da parte di esperti che è il perno dei controlli di qualità effettuati dalle riviste specialistiche: dopo tutto Hwang Woo-suk è riuscito a gabbare nientemeno che «Science», e per ben due volte. Ma in realtà il caso sottolinea che la *peer review* è solo uno degli elementi di un processo di controllo tra pari più complesso, che nel suo insieme funziona, tanto da riuscire a smantellare una frode ben congegnata da parte di uno scienziato sostenuto da un intero paese.



Di nuovo in campo. Hwang Woo-suk a febbraio 2014 nel laboratorio della Sooam Biotech Research Foundation a Seoul, dove si occupa di clonazione animale e staminali pluripotenti.

Fra questi elementi c'è il fattore umano: un ricercatore non vive in mondo ovattato, ma è sotto pressione affinché produca risultati di spicco ed è fallibile come qualunque altra persona. Questo crea forti incentivi a produrre lavori intenzionalmente ingannevoli o distorti dall'interesse personale. I revisori devono tenerne conto e sottoporre a maggiori verifiche gli articoli che presentano scoperte inattese o di grande interesse pubblico, come ha ammesso anche «Science» dopo lo scandalo di Hwang. E l'umanità delle persone che fanno ricerca agisce anche in senso positivo: sono stati i dubbi etici dei colleghi di Hwang, in particolare Roh Sung-il e Gerald Schatten, a spingerli a denunciare la falsificazione pur rischiando la carriera. Per la scienza si fa questo e altro.



di Dario Bressanini

chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie, OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Brodo sotto pressione

Con la pentola a pressione si ottiene un prodotto più aromatico, intenso e corposo

Lil brodo, sia vegetale, di pollo, di vitello, o altro, è uno dei compagni inseparabili di ogni cuoco che si rispetti. In molte cucine professionali c'è sempre una grande pentola che borbotta con brodo in preparazione, e anche nelle cucine casalinghe avere pronto un buon brodo può servire in mille preparazioni. Io spesso ne preparo un po' in anticipo, specialmente quando mi avanzano carcasse di pollo oppure liquido avanzato da un bollito, lo riduco e lo surgelo nei contenitori per fare i cubetti di ghiaccio, in modo da usarlo quando mi serve, per esempio nei risotti.

Preparare un brodo, per esempio di pollo, è facile e nelle versioni più semplici serve solo un po' di pazienza: pezzi di pollo, ossa, erbe aromatiche e i vostri ortaggi da brodo preferiti, come cipolle, carote, sedano o altro. Tutto nella pentola a sobbolire per quattro o cinque ore. Le lunghe cotture sono necessarie per estrarre tutte le sostanze gustose dai vegetali e dalla carne. La velocità con cui sono estratti aromi e sapori dipende strettamente dalla temperatura: più è alta e più velocemente avviene il processo. A meno che cuciniate in alta montagna, la temperatura tipica in cottura di un brodo è tra i 90 °C e i 95 °C.

È possibile velocizzarne la preparazione portandolo a temperature più alte usando una pentola a pressione. A coperchio chiuso il vapore che proviene dal brodo in cottura non sfugge e si accumula sopra il liquido, aumentando la pressione che può arrivare fino a due bar. In queste condizioni l'acqua bolle a temperature molto più alte di quello che farebbe senza coperchio a pressione ambiente, arrivando a circa 120 °C. A temperature così alte i processi di estrazione sono più veloci e serve non più di un'ora per preparare il brodo. Se tuttavia preparate i brodi con i due metodi, avendo cura per confrontarli correttamente di portarli allo stesso volume, per tener conto della diversa perdita di acqua, vi renderete conto che hanno un aroma e un gusto diverso.

Spesso la pentola a pressione è percepita solo come strumento per cucinare più in fretta. In realtà il prodotto finale è spesso anche diverso dal punto di vista gustativo. A 120 °C non solo l'estrazione procede più velocemente, ma le molecole estratte possono anche reagire in modo diverso. In alcuni casi sostanze aromatiche delicate possono essere distrutte, in altri possono trasformar-

si in molecole che contribuiscono al gusto finale intensificandolo. In più gli aromi estratti non sfuggono nell'atmosfera come in una cottura tradizionale ma rimangono imprigionati nella pentola e in parte ridisciolti nel brodo. Quale dei due è più buono? I gusti sono gusti, si dice, e quindi dovrete fare voi la prova. Alcuni cuochi preferiscono la versione con la pentola a pressione che trovano più intensa, con più corpo e più aromaticità. Altri la versione classica, per il suo sapore un po' diverso. Dipende tuttavia anche dal tipo di brodo e dall'uso che se ne vuol fare.

Negli ultimi anni sono comparse sul mercato delle pentole simili a quelle a pressione ma che funzionano al contrario: abba-



Estrazione veloce. Oltre ad aroma e gusti diversi rispetto alla preparazione convenzionale, la pentola a pressione rende più veloce i processi di estrazione per il brodo.

sano la pressione grazie a una pompa invece di aumentarla. Al centro ricerche Nestlé di Losanna hanno confrontato un brodo vegetale preparato a 0,48 bar, come se fosse stato preparato a 6000 metri di altitudine, con uno convenzionale e uno preparato nella pentola a pressione. Anche in questo caso il brodo è risultato diverso: a bassa pressione è risultato più ricco di alcune molecole solforate, tipiche delle cipolle e dei porri, che evidentemente a temperature più elevate vengono distrutte. Queste differenze sono state rilevate anche da un gruppo di assaggiatori. Sui brodi di carne un confronto non è ancora stato fatto. In attesa che questi apparecchi si diffondano provate a vedere se il brodo nella pentola a pressione vi piace di più o di meno di quello convenzionale.

Gli oceani che caddero dal cielo

di David Jewitt e Edward D. Young

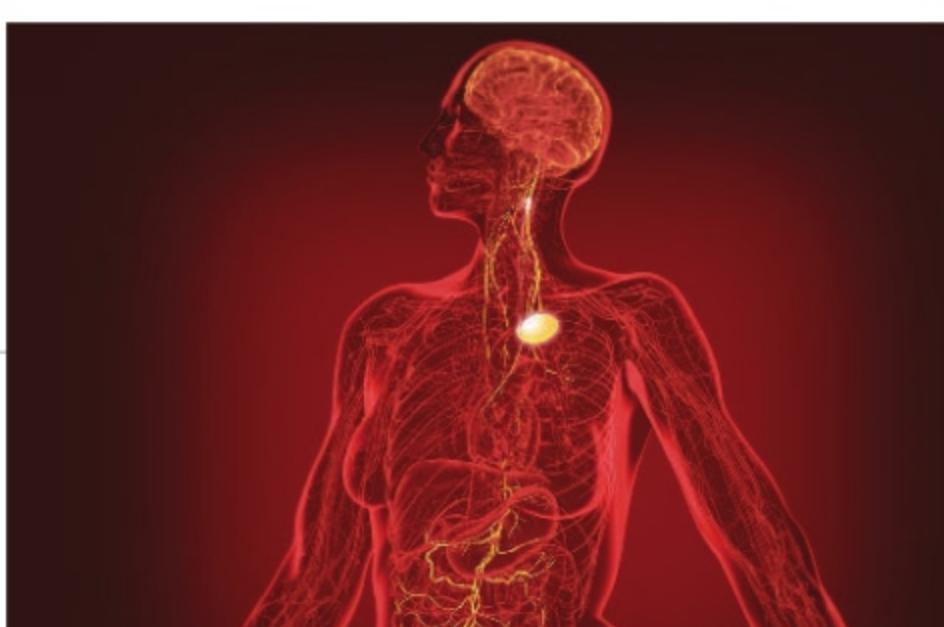
All'origine degli oceani terrestri ci furono gli asteroidi o le comete? O altri corpi celesti ancora? I dati disponibili lasciano spazio a più ipotesi alternative, inclusa quella che vede gran parte dell'acqua già presente poco dopo la nascita della Terra. La soluzione di questo annoso mistero, secondo gli astronomi, arriverà solo da ulteriori e più approfondite esplorazioni del sistema solare.



Ripensare la teoria dell'evoluzione?

di Telmo Pievani

Secondo un editoriale apparso su «Nature» mesi fa, i ricercatori sarebbero divisi su quali processi debbano essere considerati fondamentali per spiegare l'evoluzione. Ma la divisione è più apparente che sostanziale: lungi dal voler riscrivere Darwin, riguarda come aggiornare ed estendere il nocciolo centrale della sua eredità.



Terapie shock

di Kevin J. Tracey

La medicina bioelettronica, detta anche «elettroceutica», è una nuova disciplina che usa l'elettrostimolazione per curare le infiammazioni e altre malattie. La stimolazione elettrica delle vie nervose mediante impianti corporei potrebbe sostituire i farmaci per combattere processi infiammatori e malattie autoimmuni.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 98,
00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Supervisione editoriale: Daniela Hamaui

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione

Claudia Di Giorgio (caporedattore), Giovanna Salvini
(caposervizio grafico), Cinzia Sgheri,
Ale Sordi (grafico), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale

Folco Claudi, Gianbruno Guerriero

Segreteria di redazione: Lucia Realacci

Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità

A. Manzoni & C. S.p.A.

agente Paolo Bardelli (tel. 02 57494338, 335 6454332)
e-mail pbardelli@manzoni.it

Pubblicità:

A. Manzoni & C. S.p.A.

Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa

Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc,
00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione

Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek
(vice presidente), Gabriele Acquistapace,
Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
(D. lgs. 30 giugno 2003 n. 196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70
del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - marzo 2015

Copyright © 2015 by Le Scienze S.p.A.
ISSN0036-8083

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Silvia Baldi: *Curare la depressione alla radice*; Chiara Barattieri: *Un po' più di memoria*; Daniele Gewurz: *Energia dai buchi neri*, *La matematica complessa di Candy Crush*; Lorenzo Lilli: *Un puzzle per il pianeta*; Alfredo Tutino: *Menti di Neanderthal*, *La verità sui fossili viventi*.

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI SOMEDIA S.p.A.

Casella Postale 10055 - 20111 Milano

Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.

Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti

Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandi-clienti@somedia.it

Italia

abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00

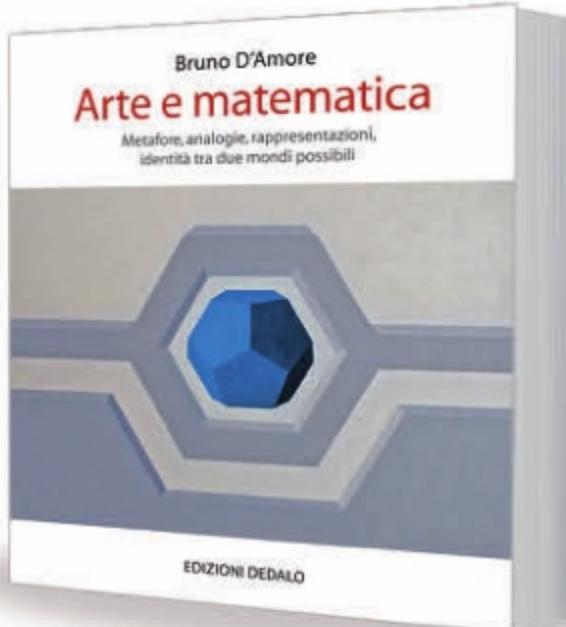
Esteri

abb. annuale Europa	€ 52,00
abb. annuale Resto del Mondo	€ 79,00



Accertamento
diffusione stampa
certificato
n. 7827 del 9/2/2015

NOVITÀ



Bruno D'Amore

Arte e matematica

Metafore, analogie, rappresentazioni, identità tra due mondi possibili

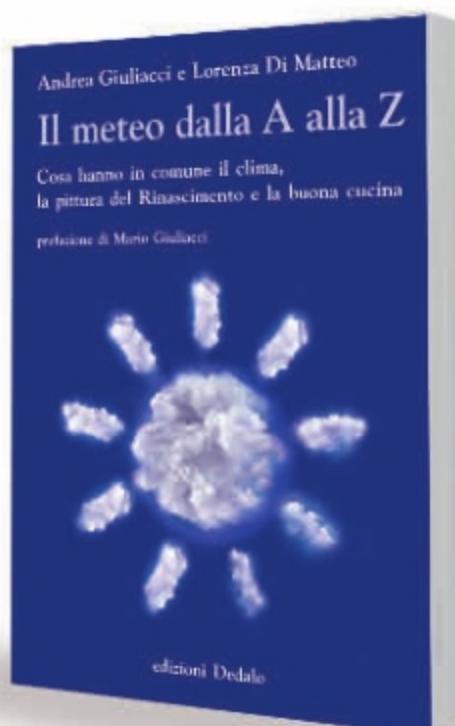
Una storia dell'arte appassionante, una storia della matematica originale: due storie in una, scritte da un matematico critico d'arte.

Paolo Gallina

L'anima delle macchine

Tecnodestino, dipendenza tecnologica e uomo virtuale

In che modo la nostra mente si modifica nell'interazione con una macchina? È vero che stiamo perdendo la nostra naturalità? E in favore di cosa?



Andrea Giuliacci - Lorenza Di Matteo

Il meteo dalla A alla Z

Cosa hanno in comune il clima, la pittura del Rinascimento e la buona cucina

Il clima e i fenomeni meteo hanno plasmato la storia, le arti e le attività socio-economiche dell'uomo: scopriamo come e perché.

Abbonati a Sapere!

Ad aprile il numero speciale dedicato all'Anno Internazionale della Luce

www.saperescienza.it



www.edizionidedalo.it

Seguici anche su





LA TUA AZIENDA È UN ORGANISMO PERFETTO.

Energia.

Ogni atleta sa quanto è importante gestirla.
Troppa e sarai pesante, poca e mangerai polvere.
L'efficienza è l'equilibrio ideale.

Da oggi pensa a Repower
come al tuo personal trainer dell'energia.

Repower è consulenza su misura per la tua azienda, elettricità e gas inclusi.
repower.com | servizio clienti 800 903 900

REPOWER
L'energia che ti serve.